

ANWENDUNG DER VORSPANNUNG OHNE VERBUND

Abschlußbericht

vorgelegt

von

o. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. K. Kordina

Dipl.-Ing. J. Hegger

Dr.-Ing. M. Teutsch

**B I B L I O T H E K**  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

Braunschweig, Januar 1983

Gefördert mit Forschungsmitteln des Ministeriums für  
Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-  
Westfalen (Az.: VB1-7202 Nr. 129/79)

Postsendungen:  
3300 Braunschweig, Beethovenstraße 52  
Fernschreiber: 9 52 698 ibstb d

Erfüllungsort und Gerichtsstand Braunschweig

Fernsprecher:  
391 5411  
Ortskennzahl 0531  
Kommt keine Verbindung zustande  
bitte 391 5431 wählen

Besuchszeiten:  
Montag bis Freitag 9 - 16 Uhr

## I n h a l t s v e r z e i c h n i s

	Blatt
1 EINLEITUNG	3
1.1 Problemstellung	3
1.2 Derzeitiger Forschungsstand	
1.3 Ziel und Umfang der eigenen Untersuchungen	10
2 VERSUCHSKÖRPER	12
2.1 Versuchskörperabmessungen	12
2.2 Bewehrungsanordnung	13
2.3 Materialkennwerte	15
2.3.1 Beton	15
2.3.2 Beton- und Spannstähle	17
2.4 Herstellung und Lagerung der Versuchskörper	18
2.5 Vorspannen	19
3 VERSUCHSEINRICHTUNG	20
3.1 Meßstellenanordnung	20
3.2 Belastungseinrichtung	21
4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	22
5 DARSTELLUNG UND AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	30
5.1 Allgemeines	30
5.2 Balkendurchbiegungen	30
5.3 Rißentwicklung	35
5.3.1 Allgemeines	35
5.3.2 Erstrißlasten	35
5.3.3 Schubrißlasten	37
5.3.4 Biegerißeiten	38

		Blatt
5.4	Spann- und Betonstahldehnungen	40
5.4.1	Spannstahldehnungen	40
5.4.2	Dehnungen der Betonstahllängsbewehrung	43
5.4.3	Bügeldehnungen	46
5.5	Betonverformungen	48
6.	ANALYSE DES TRAGVERHALTENS	50
6.1	Vergleich mit den geltenden Bemessungs- vorschriften	50
6.1.1	DIN 4227 Teil 1 bzw. Teil 6	50
6.1.2	CEB/FIP-Mustervorschrift	55
6.2	Bewertung des Tragverhaltens der Ver- suchsbalken	57
7.	ZUSAMMENFASSUNG	60
8.	LITERATURVERZEICHNIS	62

## 1. EINLEITUNG

Neben zahlreichen Anwendungen im Hochbau, insbesondere bei vorgespannten Flachdecken, wird die Vorspannung ohne Verbund in neuerer Zeit in den USA auch auf dem Gebiet des Brückenbaues eingesetzt. Am Beispiel der Seven-Mile-Bridge / 1, 2/, einer Brücke mit einer Länge von 3,7 km im Zuge der Verbindung Miami-Key West, können die Vorteile der Vorspannung ohne Verbund gegenüber der herkömmlichen Spannbetonbauweise aufgezeigt werden.

Der Spannstahl besitzt schon ab Werk seinen vollen Korrosionsschutz und bedarf somit während des Transportes, der Zwischenlagerung und in der Einbauphase nicht mehr einer besonderen Sorgfalt in der Behandlung. Infolge der geringen "Hüllrohrdurchmesser" wird durch eine größtmögliche Randlege der Spannglieder eine wirtschaftliche Ausnutzung der Vorspannung gesichert, und das aufwendige Verpressen der Hüllrohre, das bei unsachgemäßer Ausführung häufig Ursache für Korrosionsschäden ist, entfällt. Dem stehen infolge des geringeren Spannungszuwachses der verbundlosen Spannglieder eine größere Durchbiegung und eine geringere Biegebruchtragfähigkeit gegenüber.

### 1.1 Problemstellung

Die Bemessung von Bauteilen mit Spanngliedern ohne Verbund muß - wie auch bei übrigen Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen - ausreichende Bruchsicherheit und einwandfreies Gebrauchsverhalten sicherstellen. Gegenüber der Vorspannung mit Verbund ist ein zum Teil anderes Trag- und Verformungsverhalten zu berücksichtigen, das für die Vorspannung ohne Verbund zu Besonderheiten in der Bemessung führt.

Die Bauart "Vorspannung ohne Verbund" ist dadurch gekennzeichnet, daß die Spannglieder gegenüber dem Beton längsverschieblich geführt sind und die Vorspannkräfte nur über Ankerkräfte und Umlenkpressungen in das Bauteil eingeleitet werden. Die unter Beanspruchung auftretenden Querschnittsverformungen (Krümmungen und Randdehnungen) teilen sich unmittelbar nur der Betonstahllängsbewehrung mit, während der Spannungszuwachs im verbundlos geführten Spannglied nur der Summe der Betonverformungen in der Faser des betreffenden Spanngliedes entspricht. Bei einem Bauteil mit Vorspannung ohne Verbund ist der zu erwartende Spannungszuwachs im Bruchzustand in der Regel kleiner als bei einem vergleichbaren Bauteil mit im Verbund liegenden Spanngliedern. Dies kann allerdings z.T. durch höhere zulässige Spannungen im Gebrauchszustand ausgeglichen werden.

Erste theoretische Untersuchungen zum Schubtragverhalten /3,4,5/ von Bauteilen mit Vorspannung ohne Verbund zeigen, daß der Tragmechanismus sich von Bauteilen mit Verbund unterscheidet. Zur Verdeutlichung des Sachverhalts soll hier zunächst ein Bauteil mit Spanngliedern im Verbund (Bild 1.1) betrachtet werden: Überschreiten die Hauptzugspannungen  $\sigma_I$  im Stegbereich die Zugfestigkeit des Betons, dann entstehen Schubrisse, die senkrecht zu den Hauptzugspannungen in Richtung der Hauptdruckspannungen verlaufen. Die Hauptdruckkräfte können dann durch die sich zwischen den Rissen bildenden Druckstreben übertragen werden, wenn die im Beton wirkenden Zugkräfte (Resultierende aus den Hauptzugspannungen) sowohl durch Bügelbewehrung als auch durch im Verbund liegende Längsbewehrung aufgenommen werden können. Bei Rechteck- und T-Querschnitten entstehen die Schubrisse meist aus Biegerissen (Biegeschubrisse), wodurch auch ihre Neigung beeinflußt wird, während bei I-Trägern mit einem Zugflansch die Schrägrisse im Steg von der Biegung weitgehend unbeeinflußt sind. Die Neigung der Schubrisse beträgt je nach Höhe der Schubbeanspruchung und Steifigkeitsverhältnissen zwischen  $20^\circ$  und  $60^\circ$ .

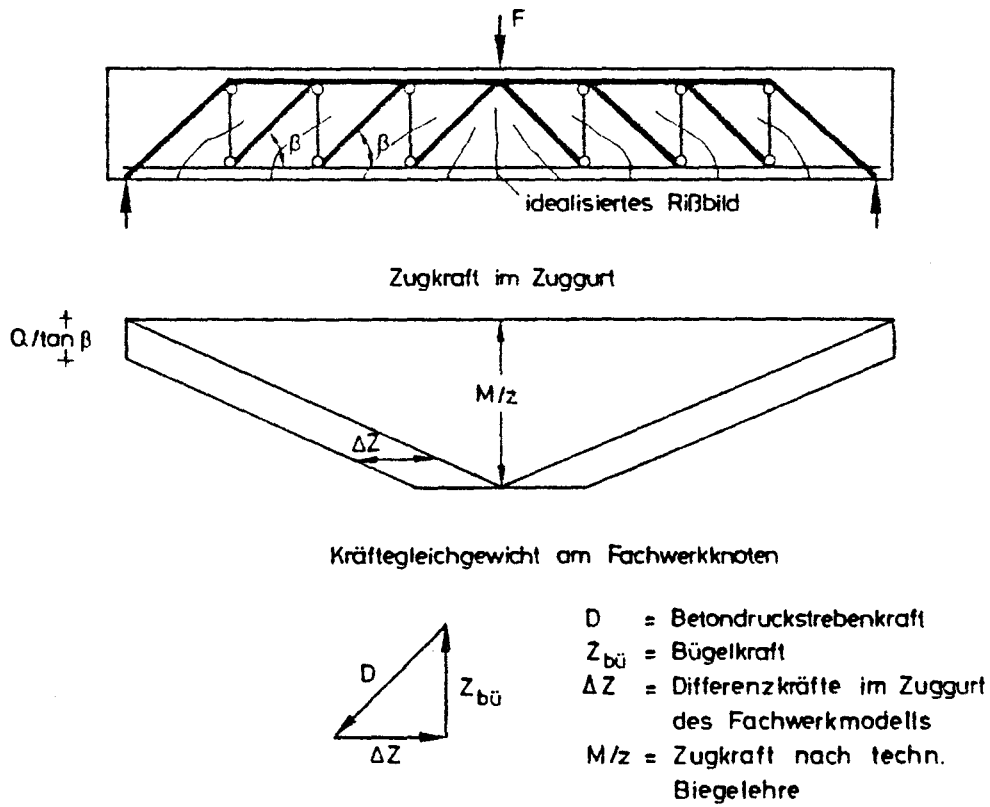


Bild 1.1: Fachwerkmodell

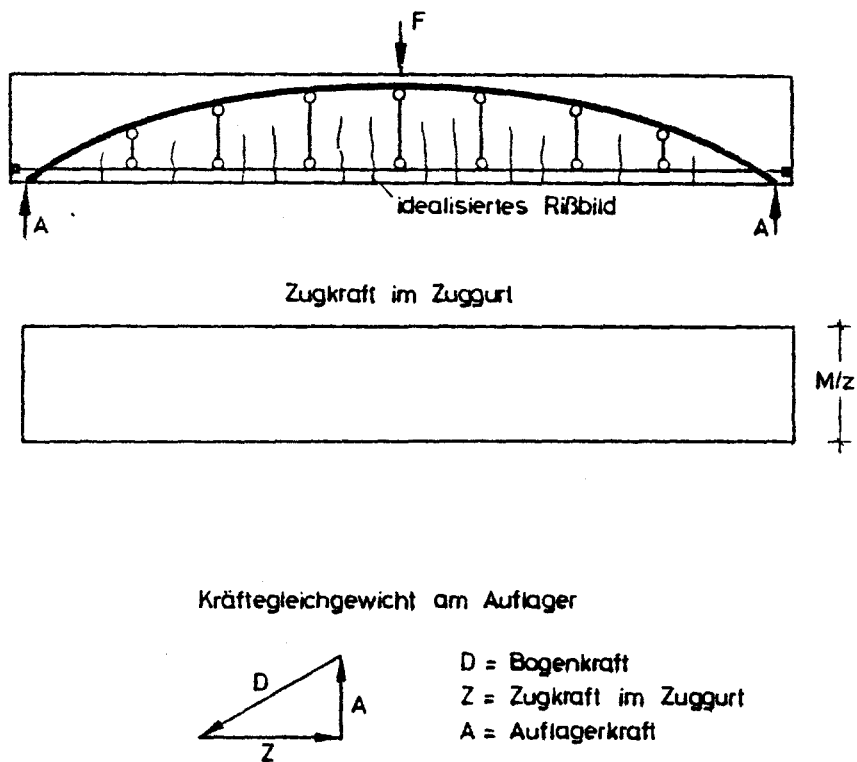


Bild 1.2 : Bogen-Zugband-Modell

Als Schubbemessungsmodell bei Stahlbeton- und Spannbetonbalken mit Verbundbewehrung wird häufig das von Mörsch entwickelte Fachwerkmodell angewandt. Während das "klassische Fachwerkmodell" nach Mörsch von unter  $45^\circ$  geneigten Druckstreben ausgeht, sind nach der "erweiterten Fachwerkanalogie" auch Druckstrebenneigungen von weniger als  $45^\circ$  möglich. Nach dem Fachwerkmodell stellen die Schubbewehrungsstäbe die Zugstäbe, die Betonprismen zwischen den Schubrisen, die Druckstreben eines engmaschigen Fachwerks (Netzfachwerk) dar. An jedem Knoten dieses Fachwerks müssen die schiefen Druckstrebenkräfte, die Zugkräfte in den Bügeln oder Schrägstäben und die Versatzkräfte  $\Delta Z$  in der Längsbewehrung im Gleichgewicht stehen. Durch die Versatzkräfte  $\Delta Z$  wird die aus der Stabstatik abzuleitende Zugkraft im Zuggurt (M/z-Linie) vergrößert und bei der Bemessung durch eine horizontale Verschiebung der M/z-Linie zum Auflager hin (vergl. Bild 1.1) berücksichtigt.

Bei einem Bauteil, dessen Zuggurt ausschließlich aus einem Spannglied ohne Verbund besteht, ist die Aufnahme der Versatzkräfte  $\Delta Z$  ungeklärt. Zum besseren Verständnis soll hier nach den beiden Schubbereichen Zone a (Zugzone im rechn. Bruchzustand nicht gerissen) und Zone b (Zugzone im rechn. Bruchzustand gerissen) unterschieden werden. In der Zone a mit ungerissenem Zuggurt ist davon auszugehen, daß die Versatzkräfte  $\Delta Z$  durch den vorgedrückten Zuggurt aufgenommen werden können. Der Schubnachweis kann hier wie bei Vorspannung mit Verbund geführt werden. Im Bereich b mit gerissener Zugzone ist das Gleichgewicht am Fachwerkknoten nicht gegeben, da die Versatzkräfte  $\Delta Z$  ohne zusätzliche schlaffe Betonstahlbewehrung im Zuggurt nicht aufgenommen werden können. Die schiefen Druckstreben können im gerissenen Zuggurt keine Widerlager finden, erst im Balkenbereich der Zone a oder an der Verankerungsstelle des Zuggurtes werden die zum Gleichgewicht notwendigen Versatzkräfte aufgenommen.

Die Querkraftaufnahme in Bereichen mit gerissener Zugzone kann hier demnach nur durch Ausbildung eines Sprengwerkes über Bogen-Zugband-Wirkung erfolgen.

Bei der Anwendung derartiger Modelle ist jedoch zu berücksichtigen, daß besonders bei profilierten Querschnitten die schiefen Hauptdruckspannungen des Steges wesentlich größer sind, als die eines Rechteck-Balkens mit Verbundbewehrung und somit die Gefahr eines Betondruckstrebenbruches ansteigt. Andererseits bedeutet aber auch eine Lastabtragung nach dem Bogen-Zugband-Modell, daß keine Bügelbewehrung zur Aufnahme von Fachwerk-Zugkräften erforderlich ist. Durch Bügel kann hier i.a. nur eine Umschnürung des Druckbogens und hierdurch u.U. eine Traglaststeigerung bewirkt werden.

Eine Lastabtragung nach dem Bogen-Zugband-Modell wird sich immer nur dann einstellen, wenn der Zuggurt im gesamten Bereich, in dem er als Zuggurt des Bogen-Zugband-Modells wirkt, Risse aufweist. Andernfalls werden die Querkräfte nach dem Fachwerkmodell abgetragen. Bei Bauteilen mit Spanngliedern ohne Verbund treten im Bereich der maximalen Momentenbeanspruchung - wie zahlreiche Versuche zur Bestimmung der Biegetragfähigkeit im Bruchzustand /7,8,9,10,11/ gezeigt haben - nur wenige Biegerisse in einem eng begrenzten Bereich auf. Ist neben den verbundlosen Spanngliedern keine Betonstahllängsbewehrung vorhanden, bildet sich in der Regel nur ein Biegeriß an der Stelle der maximalen Biegebeanspruchung. Erst mit zunehmender schlaffer Längsbewehrung nimmt die Zahl der Biegerisse und die Länge der gerissenen Zugzone zu. Danach wird das Sprengwerk bzw. Bogen-Zugband-Modell bei Bauteilen, deren Zuggurt ausschließlich aus Spanngliedern ohne Verbund besteht, nur in einem sehr eng begrenzten Bereich zur Anwendung kommen. Bei vorhandener schlaffer Längsbewehrung wird zwar die Länge der gerissenen Zugzone zunehmen, aber gleichzeitig können durch diese Bewehrung Versatzkräfte  $\Delta Z$  aufgenommen werden und es kann sich eine Fachwerk-Tragwirkung einstellen.



In diesem Fall erscheint ein kombiniertes Bogen-Zugband-Fachwerkmodell zur Erfassung der Schubtragfähigkeit geeignet. Inwieweit dieser Bemessungsvorschlag dem tatsächlichen Schub-Tragverhalten entspricht oder in wieferne er verbessert werden kann, soll im Rahmen dieses Forschungsvorhabens experimentell durch 4 Balkenversuche untersucht werden.

### 1.2 Derzeitiger Forschungsstand

Die ersten Untersuchungen /5,6,7,8,9/ an Balkentragwerken mit Spanngliedern ohne Verbund zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit wurden in den fünfziger Jahren durchgeführt. Die seitdem vorgenommenen theoretischen und experimentellen Untersuchungen beschäftigten sich fast ausschließlich mit dem Biegetragverhalten und dem möglichen Spannungszuwachs der Spannglieder im Bruchzustand. Ein Überblick über den derzeitigen Forschungsstand und der durch Versuche noch zu klärenden Probleme auf dem Gebiet der Biegetragfähigkeit wird in /11/ gegeben. Erwähnenswert ist noch eine neuere Untersuchung /12/ zur Biegetragfähigkeit von vorgespannten Kragträgern im Freivorbau, deren Spannglieder im Bauzustand noch nicht verpreßt sind.

Zur Klärung des Schubtragverhaltens von Balken mit Vorspannung ohne Verbund sind bis zum heutigen Zeitpunkt nur sehr wenige Versuche durchgeführt worden. Erste systematische experimentelle Untersuchungen zum Biege- und Schubtragverhalten führte Lorentzen /13/ an 10 Balken mit Spanngliedern ohne Verbund durch. Alle Versuchsbalken waren ohne Schubbewehrung ausgebildet. Nach Lorentzen erfolgt die Lastabtragung für derartige Bauteile nach dem Bogen-Zugband-Modell.

Das Schubrißverhalten von unbewehrten Balkenstegen wurde von Jena und Pannell /14/ an 20 Zweifeldträgern mit I-Querschnitt

untersucht. Die geprüften Balken besaßen keine Schubbewehrung und ihre Längsbewehrung bestand ausschließlich aus Spanngliedern ohne Verbund. Bei 17 Versuchabalken war ein Schubversagen die Bruchursache, bei den übrigen 3 Versuchsbalken trat ein Biegebruch auf. Jena und Pannell stellten fest, daß nach Auftreten der ersten Schubrisse in den unbewehrten Balkenstegen nur noch eine geringe Laststeigerung möglich war. Sie schlagen deshalb vor, den von ihnen entwickelten Rechenansatz zur Bestimmung der Erstschubrißlast auch zur Bestimmung der Schubbruchlast von unbewehrten Balkenstegen zu verwenden.

In einem Arbeitspapier der CEB-Kommission "Querkraft und Torsion" /15/ behandelt Regan das Schubtragverhalten von Balkentragwerken mit Vorspannung ohne Verbund. Der von ihm durchgeführte Vergleich der Versuchsergebnisse von Lorentzen / 13 / mit den rechnerischen Schubrißtraglasten nach der CEB-Mustervorschrift zeigt, daß die im Versuch erreichten Lasten geringfügig oberhalb der rechnerischen Schubtragfähigkeit für Balken ohne Schubbewehrung bei Vorspannung mit Verbund liegen. Die Bemessungsgleichungen 11.2 und 11.3 (Schubtragfähigkeit für Balken ohne Schubbewehrung) der CEB-Mustervorschrift /16/ sind empirische Bemessungsansätze. Als Einflußparameter gegen die Bauteilhöhe, die Betongüte, der Längsbewehrungsgehalt und der Grad der Vorspannung in den Bemessungsansatz ein.

Im Rahmen der Beratungen zur DIN 4227 Teil 6 "Vorspannung ohne Verbund" wurden von Jungwirth /3/ folgende Überlegungen zum Schubtragverhalten gemacht: Solange die Biegezugzone im rechnerischen Bruchzustand ungerissen bleibt, wird sich für die Querkraftabtragung ein Fachwerkmodell einstellen, da der überdrückte Zuggurt die Versatzkräfte nach der Fachwerkanalogie aufnehmen kann. Bei gerissener Zugzone im rechnerischen Bruchzustand ist das Bogen-Zugband-Modell anzuwenden, wobei die Bruchlast aus der Tragfähigkeit des Druckbogens ermittelt wird. Ist in der gerissenen Zugzone

neben den Spanngliedern ohne Verbund Betonstahl-Längsbewehrung vorhanden, findet eine Überlagerung der Fachwerkwirkung und der Bogen-Zugband-Tragwirkung statt. Die dem Fachwerk zuzuweisende anteilige Querkraft kann aus dem Verhältnis der Momententragfähigkeit von Betonstahlbewehrung zur verbundlosen Spannbewehrung errechnet werden. Für diesen Querkraftanteil sind Bügel nach der Fachwerkanalogie zu bemessen. Gleichzeitig sind Hauptdruckspannungen aus der geometrischen Summe der Fachwerkstreben- und Bogenspannungen nachzuweisen.

In der DIN 4227 Teil 6 "Vorspannung ohne Verbund" (Ausgabe 6/82) /17/ wird keine eindeutige Regelung getroffen, nach welchem Tragmodell die Schubbemessung erfolgen soll. Einerseits wird in DIN 4227 Teil 6 festgelegt, daß für den Schubnachweis im rechnerischen Bruchzustand nach DIN 4227 Teil 1 /18/ zu verfahren ist, d.h. der Nachweis erfolgt auf Grundlage des Fachwerkmodells. Andererseits wird aber auch erlaubt, die Spannungen und die erforderliche Schubbewehrung mit Hilfe des Bogen-Zugband- bzw. Sprengwerk-Modells nachzuweisen.

In einer Reihe weiterer Veröffentlichungen /4,5,10/ werden ebenfalls Überlegungen zur Schubbemessung vorgestellt, die aber im wesentlichen die Bemessungsvorschläge von Jungwirth wiedergeben.

### 1.3 Ziel und Umfang der eigenen Untersuchungen

Der Überblick über die bislang vorliegenden Untersuchungen zum Schubtragverhalten von Balkentragwerken mit Vorspannung ohne Verbund läßt erkennen, daß zwar schon eine Reihe von Studien zum Schubtragverhalten durchgeführt worden sind, aber noch nicht hinreichend geklärt ist, mit welchem Modell das Schubtragverhalten wirklichkeitsnah beschrieben werden kann.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen folgende Einflußparameter variiert werden :

Querschnittsausbildung  
Bügelbewehrungsgrad,  
Betonstahllängsbewehrungsgrad im Zuggurt.

Die Untersuchungen erstrecken sich auf 4 Versuchsbalken. Dabei diente der Versuchsbalken BO mit I-Querschnitt und im Verbund liegender Spannbewehrung als Vergleichsbalken. Die Balken B1 und B2 mit I-Querschnitt und der Balken B3 mit T-Querschnitt waren mit Spanngliedern ohne Verbund vorgespannt. Bei allen Balken wurde der Schubbewehrungsgrad und die schlaffe Längsbewehrung in der Zugzone variiert.

## 2. VERSUCHSKÖRPER

### 2.1 Versuchskörperabmessungen und Belastung

In Bild 2.1 und Tabelle 2.1 wird eine Übersicht über die geprüften Balken gegeben. Sie weisen folgende Grundmerkmale auf :

Spannweite  $\ell = 4,00$  m, Überstand an bei den Enden 12,5 cm,  
Balkenhöhe  $d = 74$  cm

Abstand der resultierenden Spanngliedachse vom Druckrand  $h_z = 63$  cm

Flanschbreite  $b = 60$  cm

Stegdicke  $b_o = 10$  cm

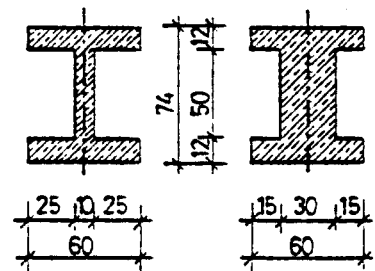
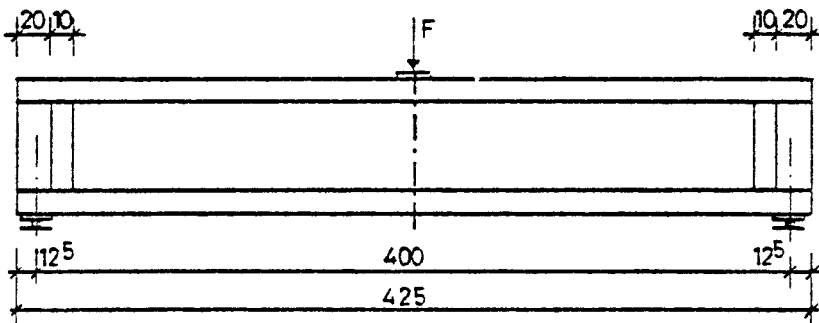
Die Belastung erfolgte bei allen Balken durch eine mittige Einzel-  
last.

Aus den Systemabmessungen ergibt sich eine Schubschlankheit von

$$s = \frac{M}{Q \cdot z} = \frac{a}{z} = \frac{2,0}{0,62} = 3,23 \quad (2.1)$$

Unterschiedlich war die Querschnittsausbildung: Während die Balken BO - B2 einen I-förmigen Querschnitt besaßen, wurde der Versuchskörper B3 als T-Querschnitt ausgebildet.

Versuchsbalken B0, B1, B2



Versuchsbalken B3

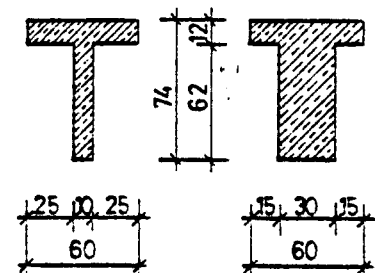
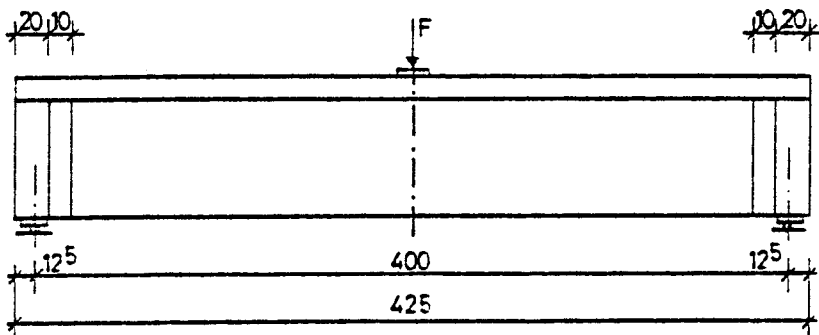


Bild 2.1 Abmessungen der Versuchsbalken

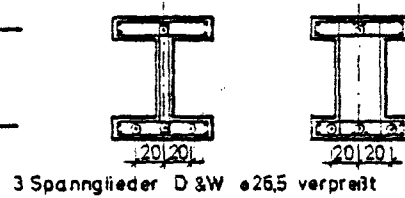
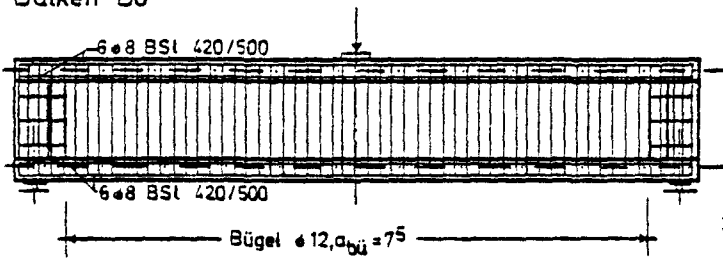
			VERSUCHSKÖRPER			
			B0	B1	B2	B3
Parameter	Querschnittsform		<b>I</b>	<b>I</b>	<b>I</b>	<b>T</b>
	Vorspannung		mit Verbund	ohne Verbund	ohne Verbund	ohne Verbund
	Stegbewehrungsgrad					
	$\mu_{s1}$ = Li. Balkenhälfte		3,01%	0,18%	1,34%	1,34%
	$\mu_{s2}$ = Re. Balkenhälfte		3,01%	2,09%	2,09%	2,09%
	Betonstahlbewehrung in der Zugzone BSt 420/500		6 ø 8	6 ø 10	6 ø 6	1 ø 6
Alter der Versuchskörper beim Versuch [Tage]			27	37	30	29
Betonfestigkeiten	im Alter des Versuchs nach 7 bzw. 28 Tg.	Würfeldruckfestigkeit $\beta_{W7}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	15	15	21	23
		Würfeldruckfestigkeit $\beta_{W28}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	23	21	28	32
		Würfeldruckfestigkeit $\beta_W$ [N/mm <sup>2</sup> ]	22	21	28	32
		Prismendruckfestigkeit $\beta_P$ [N/mm <sup>2</sup> ]	20	19	26	28
		Elastizitätsmodul $E_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	16200	20400	24900	21800
		Spaltzugfestigkeit $\beta_{SZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,8	1,9	2,3	1,9
	im Alter des Versuchs nach 28 Tg.	Biegezugfestigkeit $\beta_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,3	2,3	2,9	2,9

Tabelle 2.1 : Bezeichnungen und Merkmale der Versuchsbalken

## 2.2 Bewehrungsanordnung

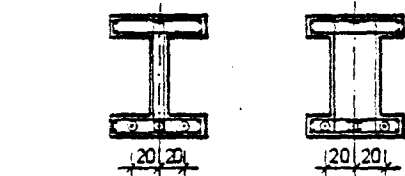
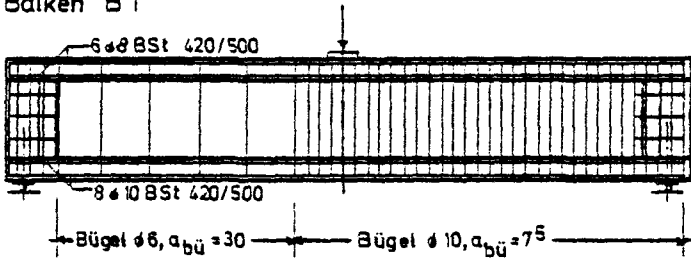
Die Lage der Spannglieder und die Verteilung der Betonstahlbewehrung sind in Bild 2.2 skizziert. Die Vorspannung erfolgte bei den Balken B0, B1 und B2 jeweils mit 3 Stabspanngliedern  $\varnothing 26,5$  (Stahlgüte St 835/1030) der Fa. Dyckerhoff & Widmann AG. Die Spannglieder dieser Balken sind im Zuggurt mit einem seitlichen Abstand von 20 cm in einem Hüllrohr geführt. Dabei wurde nur beim Vergleichsbalken B0 Verbund zwischen Beton und Spanngliedern durch Einpressen eines Injektionsmörtels hergestellt. Die hier gewählten Spannglieder sind nicht typisch für die Vorspannung ohne Verbund, da sie keinen für baupraktische Zwecke notwendigen Korrosionsschutz besitzen. Dieser war jedoch für die Versuchsdurchführung nicht erforderlich.

Balken B0



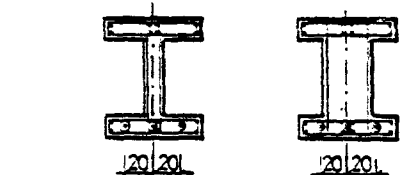
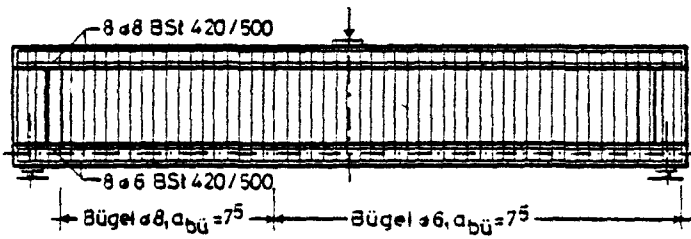
3 Spannglieder D & W #26,5 verpreßt

Balken B1



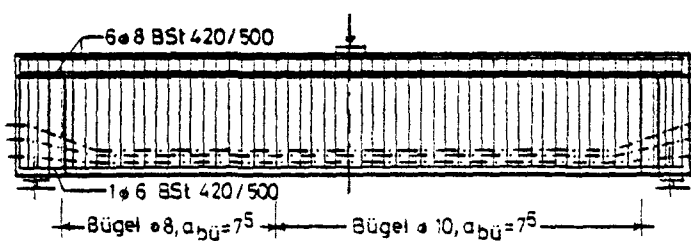
3 Spannglieder D & W #26,5 nicht verpreßt

Balken B2



3 Spannglieder D & W #26,5 nicht verpreßt

Balken B3



8 Spannglieder VSL Monolitzen 0,6''

Bild 2.2: Abmessungen und Bewehrung der Versuchsbalken

Beim Einbau der Spannglieder wurde auf eine mittige Lage der Spannglieder im Hüllrohr mit besonderer Sorgfalt geachtet, um einen Kontakt zwischen den Spanngliedern und dem Beton zu vermeiden. Eine Untersuchung der Spannglieder nach Ende der experimentellen Untersuchung und die spätere Auswertung der Spannmeßstellen zeigten, daß keine Kräfte von den Spanngliedern über Reibung auf den Beton übertragen werden. Beim Balken B3 wurden als Spannglieder in der verbundlosen Spannbeton-

bauweise übliche 7-drähtige VSL Monolitzen 0,6" eingelegt. Die Litzen sind mit dem Korrosionsschutzfett NONTRIBOS gefettet und mit einem 1 mm starken aufextrudiertem PE-Mantel versehen. Aufgrund der geringen zulässigen Spanngliedabstände von 2 cm konnten die Spannglieder trotz des fehlenden Zuggurtes beim Versuchsbalken B3 annähernd im gleichen Abstand vom Zugrand geführt werden wie bei den Balken B0 bis B2. Allein im Verankerungsbereich war es erforderlich, die Spannglieder zur Balkenschwerachse hin aufzufächern. Als Versuchsparameter wurde bei allen Balken die Betonstahlbewehrung, bestehend aus Bügel- und Längsbewehrung in der Zugzone variiert. Die beiden Balkenhälften wurden grundsätzlich - ausgenommen Versuchsbalken B0 - mit unterschiedlichem Schubbewehrungsgehalt ausgeführt. Anhand der unterschiedlichen Bewehrungsmengen sollte geklärt werden, inwieweit die Lastabtragung entweder nach dem Bogen-Zugband-Modell oder dem Fachwerkmodell oder durch eine Kombination beider Tragmodelle erfolgt. Die Zugbewehrung bestand aus zweischnittigen lotrechten Bügeln mit einem Schubbewehrungsgrad zwischen  $\mu_s = 18\%$  und  $\mu_s = 3,01\%$ . Die Längsbewehrung in der Zugzone betrug zwischen  $A_{s2} = 0,28 \text{ cm}^2$  ( $\mu_s = 0,01\%$ , 1Ø6) bei Balken B3 und  $A_s = 6,28 \text{ cm}^2$  ( $\mu_s = 0,32\%$ , 8Ø10) bei Balken B1.

## 2.3 Materialkennwerte

### 2.3.1 Beton

Im Vordergrund der hier beschriebenen Untersuchungen stand das Schubtragverhalten. Als Bruchursache wurde hauptsächlich ein Versagen des Betons im Betondruckgurt bzw. in den Druckstreben angestrebt. Deshalb war es notwendig, zur Herstellung der Balken einen Beton mit möglichst niedriger Festigkeit zu verwenden. Bei allen Versuchskörpern wurde eine Betonnennfestigkeit B25 angestrebt.



BALKEN	ANTEILE JE m <sup>3</sup> FRISCH VERDICHETEN BETON IN Kg							Ausbreitmaß a in cm
	ZEMENT	WASSER	0/2	2/8	8/16	Σ	w=W/Z	
B 0	253	177	1215	468	187	1870	0,70	45
B 1	264	245	996	634	181	1811	0,93	45
B 2	300	221	1017	648	185	1850	0,77	47
B 3	300	247	1056	672	192	1920	0,82	47

Tabelle 2.2 : Frischbetoneigenschaften

Der Wasser/Zement-Wert betrug beim Versuchsbalken B0 0,70, bei den anderen Versuchskörpern i.M. 0,84. Der Zementgehalt lag i.M. bei 279 kg pro m<sup>3</sup> frisch verdichtetem Beton bei Verwendung eines güteüberwachten Portlandzementes PZ 35 F.

Das Größtkorn der Zuschläge betrug 16 mm, das Ausbreitmaß lag zwischen 45 und 47 cm. Die genaue Frischbetonzusammensetzung kann der Tabelle 2.2 entnommen werden.

Zur Ermittlung der Materialeigenschaften des Betons wurden während des Betonierens der Versuchsbalken zahlreiche Begleitkörper (Würfel, Spaltzugkörper und Prismen) hergestellt, anhand derer die Betongüte (Lagerung nach DIN 1048) sowie die Festigkeitsentwicklung des Betons (Lagerung der Begleitkörper wie die Versuchsbalken) ermittelt wurden. Die Mittelwerte dieser Untersuchungen sind in Tabelle 2.1 zusammengefaßt, die an Prismen gewonnenen Spannungs-Dehnungslinien sind in Bild 2.3 wiedergegeben. Die dort angegebenen E-Moduli entsprechen der Steigung im unteren Drittel der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie.

Stahlgüte	Nennndurchmesser $d_s$ in mm	$A_s$ in mm <sup>2</sup>	$\beta_s$ in N/mm <sup>2</sup>	$\beta_z$ in N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung in %
BSt 420/500 RK	6	28,7	446	542	13,9
	8	51,2	431	513	12,3
	10	77,2	428	494	11,3
	12	111,7	444	53	14,2
	14	149,6	434	506	12,4
St 835 / 1030	26,5	547	894	1097	9,7
St 1570/1770	0,6"	138,8	1743	1858	5,6

Tabelle 2.3 : Festigkeiten der Beton- und Spannstähle

#### 2.4 Herstellung und Lagerung der Versuchskörper

Vor Montage der Bewehrungskörbe wurden bei den Balken B0 - B2 die an vorgegebenen Stellen mit Dehnmeßstreifen versehenen Spannglieder in die Hüllrohre eingefädelt und durch Schablonen in ihrer endgültigen Lage fixiert. Die Meßkabel der auf den Spannstäben sitzenden Dehnmeßstreifen wurden durch in der Höhe der DMS in die Hüllrohre geschnittene Öffnungen nach außen geleitet; diese Öffnungen wurden anschließend wieder sorgfältig verschlossen, um ein Eindringen des Frischbetons in die Hüllrohre auszuschließen.

Bei den Spanngliedern des Balkens B3 konnten, bedingt durch den die Spannglieder (Litzen) umgebenden PE-Mantel, keine Dehnmeßstreifen angebracht werden. Hier erfolgte die Kontrolle der Spanngliedkräfte über Kraftmeßdosen am Festanker.

Während der ersten sieben Tage nach dem Betonieren wurden die Balken mit feuchten Tüchern abgedeckt, danach lagerten sie bis zum Versuchsbeginn bei normalen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen.

## 2.5\_Vorspannen

Zum gefahrlosen Transport und um ein vorzeitiges Versagen der Biegezugzone zu verhindern, wurde beim Balken B3 vor dem Umsetzen auf die Auflager des Prüffeldes eine Teilvorspannung aufgebracht. Bei den übrigen Balken wurde keine Teilvorspannung aufgebracht, da hier eine größere Biegezugzone und eine ausreichende Betonstahllängsbewehrung vorhanden war.

Nach dem Aufsetzen der Balken auf die Auflager wurden die Vorspannkräfte aufgebracht. Die Balken mit Vorspannung ohne Verbund erhielten dabei zu Versuchsbeginn nur einen Teil der vollen zulässigen Vorspannung, um ein Aufreißen der Betondruckzone zu verhindern. Bei dem Vergleichsbalken B0 wurden die Spannglieder 10 Tage vor Versuchsbeginn mit der vollen zulässigen Spannkraft vorgespannt und anschließend die Hüllrohre mit Einpreßmörtel verfüllt. Das Injizieren der Hüllrohre erfolgte in Anlehnung an DIN 4227 Teil 5 : Dem Einpreßmörtel aus PZ 45F wurde als Einpreßhilfe 1% TRICOSAL - 181 H zugesetzt, Der W/Z-Wert betrug 0,44. Um ein Aufreißen in der Betondruckzone zu vermeiden, erhielt der Versuchsbalken B0 eine Vorspannung der Biegedruckzone durch ein in der Druckzone verbundlos geführtes Montagespannglied. Dieses Spannglied wurde im Verlauf des Versuches bei einer Last  $F = 60 \text{ kN}$  entlastet. Die Steuerung der Spannpressen erfolgte für die Stabspannstähle anhand der auf dem Spannstahl direkt mit DMS gemessenen Dehnungen, bei den VSL Monolitzen über am Festanker der Litzen angeordneten Kraftmeßdosen.

### 3. VERSUCHSEINRICHTUNG

#### 3.1 Meßstellenanordnung

Die Anordnung der Meßstellen wird im Anhang in den Bildern A 3.1 bis A 3.6 für alle Balken wiedergegeben.

Alle Balken waren mit Dehnmeßstreifen an den Bügeln versehen. An einzelnen ausgewählten Bügeln waren jeweils 3 Meßstellen auf den Bügelschenkeln angeordnet. Die genaue Lage der Bügelmeßstellen kann dem Bild A 3.1 des Anhangs entnommen werden.

Die Dehnungen des Spannstahls wurden bei den Trägern B0, B1 und B2 mit Dehnmeßstreifen auf den Spanngliedern in verschiedenen Querschnitten gemessen (Anhang Bild A 3.2). Die Spannkraftänderungen der VSL Monolitzen beim Balken B3 wurden mit Kraftmeßdosen, die am Festanker zwischen Ankerplatte und Keilverankerung angeordnet waren, erfaßt (Anhang Bild A 3.3).

Bei dem Balken B2 wurden die in der vorgedrückten Zugzone liegenden Betonstähle (3 Ø 6) an verschiedenen Stellen, verteilt über die gesamte Länge, mit Dehnmeßstreifen versehen (Bild A 3.4).

Zur Messung der Stauchungen in der Druckzone waren in beiden Balkenhälften rechts und links neben der Einzellast 3 Meßstrecken von 100 mm für Setzdehnungsmesser angeordnet (Bild A 3.5).

Die Messungen der Betonverformungen im Steg erfolgte durch Setzdehnungsmesser mit einer Meßbasis von 100 mm. In verschiedenen Meßquerschnitten wurden vor dem Vorspannen Meßrosetten angebracht, an denen die Dehnungen in 3 Richtungen ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) gemessen wurden, die somit eine Bestimmung der Hauptdehnungen ermöglichten. Zusätzlich wurden nach Ausbildung eines ausgeprägten Schubrißbildes weitere Setz-

dehnungsmeßstellen angeordnet, um die Verformungen der Betondruckstreben zu erfassen. Die Lage der Setzdehnungsmeßstellen ist in den Anlagen A 2.1 bis A 2.4 aufgeführt, in denen gleichzeitig auch das Rißbild im Versagenszustand wiedergegeben wird.

An den Stellen  $X = 0,0$  (Feldmitte)

$X = \pm 0,30 \text{ m}$

$X = \pm 0,60 \text{ m}$

$X = \pm 1,30 \text{ m}$

wurde die Durchbiegung mit induktiven Weggebern gemessen (Bild A 3.6).

Die Rißbildung wurde laststufenweise durch Markierungen am Balken gekennzeichnet, so daß das zu einer Laststufe gehörige Rißbild nachgezeichnet werden konnte. Die Rißbreiten wurden in ausgewählten Laststufen entlang mehrerer Meßlinien gemessen. Die Meßstellen für die Rißbreiten sind im Rißbild gekennzeichnet und durchnummeriert (Anhang Bild A 2.1 bis A 2.4). Das Messen der Rißbreiten erfolgte unter Verwendung einer Videokamera, mit der die Rißbreiten an den vorher festgelegten Meßpunkten aufgezeichnet und später mittels eines geeichten Maßstabes am Bildschirm ausgewertet wurden.

Sämtliche elektronischen Messungen wurden mit einer Vielstellenmeßanlage UPH 3200 vom Typ Hottinger durchgeführt und mit dem "Graphischen System Tektronix 4051" abgespeichert und mit Hilfe der Institutsrechenanlage PRIME 400 ausgewertet.

### 3.2 Belastungseinrichtung

Das statische System sowie die Belastungsanordnung sind im Bild 3.1 skizziert. Zur Aufbringung der Versuchslasten wurde eine 1000 kN-Amsler-Pressen benutzt. Die Größe der aufgebrachten Kräfte wurde mittels einer Kraftmeßdose und eines Öldruckgebers kontrolliert.

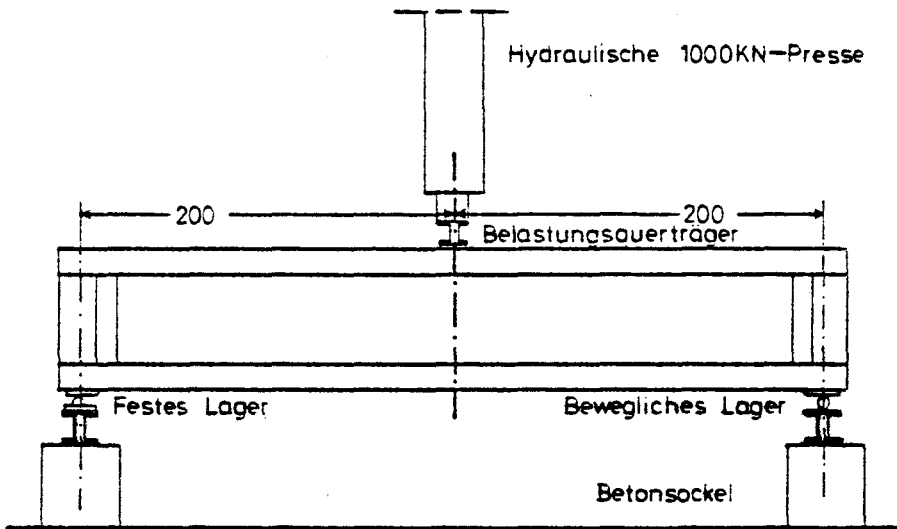


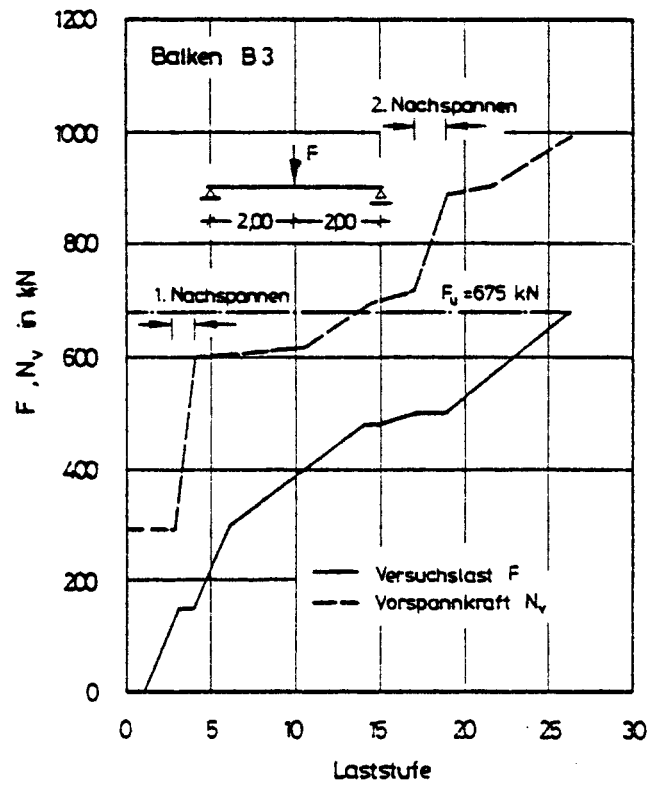
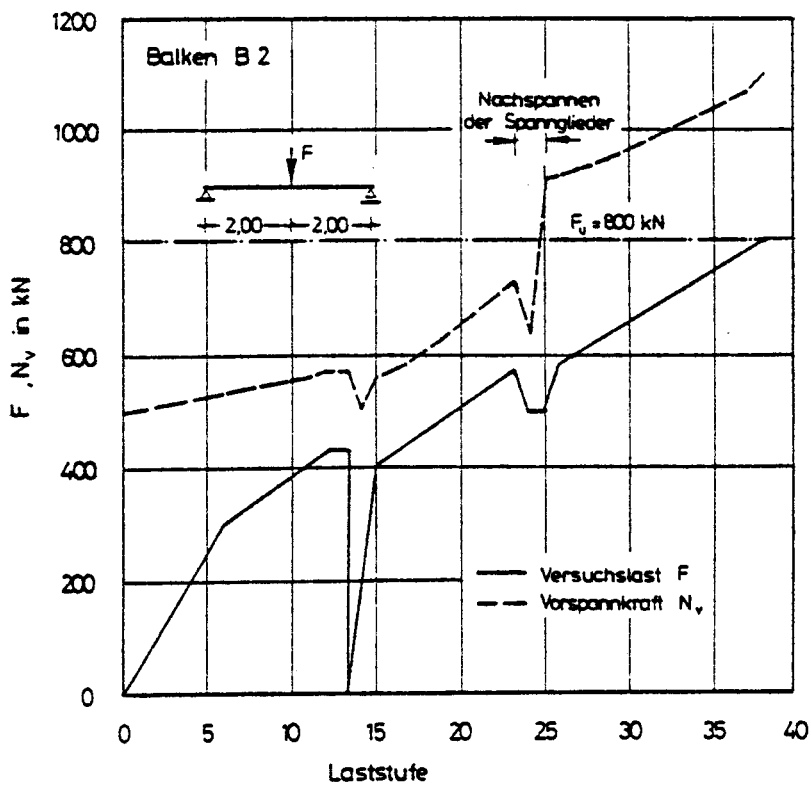
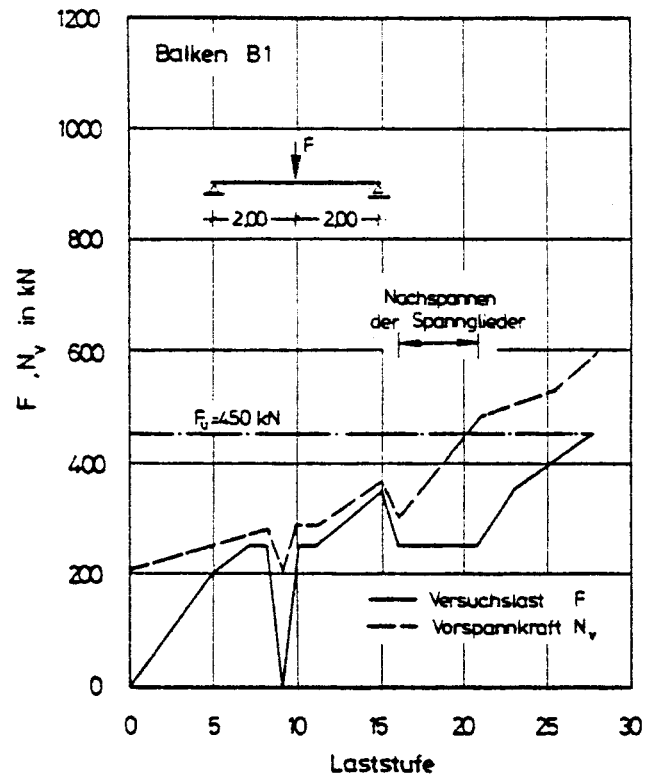
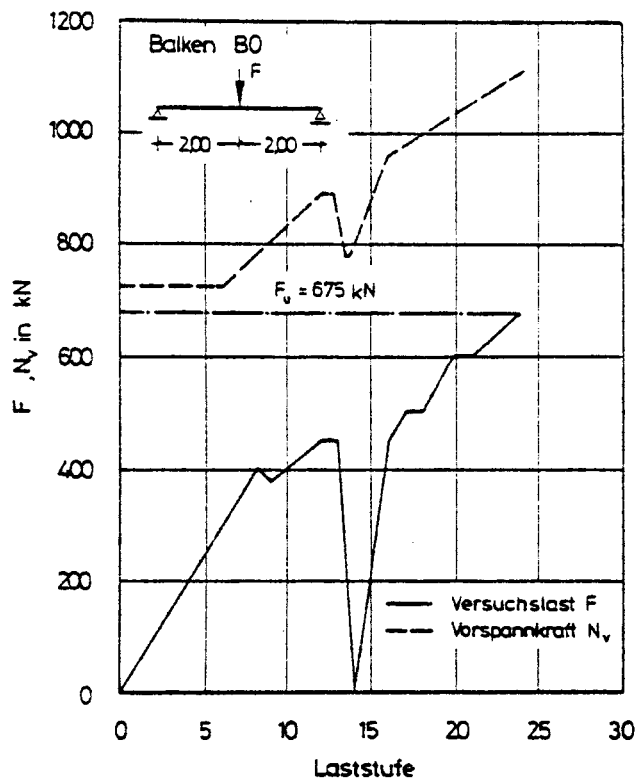
Bild 3.1 : Versuchsaufbau

#### 4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Das Belastungsprogramm aller vier Balken dieser Serie war im wesentlichen gleich.

Der in Bild 4.1 graphisch zusammengefaßte Belastungsablauf kann in 3 Phasen aufgesplittet werden :

- 1.Phase : stufenweise steigende statische Beanspruchung zur Erzeugung eines weitgehend abgeschlossenen Schubrißbildes.
- 2.Phase : ca. 15 Stunden Standzeit unter der maximalen Last der 1. Phase.
- 3.Phase : Nachspannen der Spannglieder ohne Verbund zur Vermeidung eines vorzeitigen Biegebruches, stufenweise statische Laststeigerung bis zum Eintreten des Schubversagens.



**Bild 4.1** : Belastungsfolge mit zugehöriger Vorspannkraft der Versuchsbalken B0 bis B3

Die erste Belastungsphase der Balken diente zur Erzeugung eines weitgehend abgeschlossenen Schubrißbildes. Die Balken B1 bis B3 waren so bemessen, daß die ersten Schubrisse etwa zusammen mit den Biegerissen auftraten; der Balken B0 war so ausgelegt, daß sich Schubrisse bildeten, bevor die Biegezugfestigkeit des Betons ausgeschöpft war.

Bei jeder Laststufe wurden rd. 3 Minuten nach Erreichen der Last die Balkendurchbiegungen, die Betonverformungen, die Betonstahl- und Spannstahldehnungen sowie die Rißbreiten gemessen und das Rißbild aufgezeichnet.

Bei einer Belastung zwischen  $F = 250 \text{ kN}$  (Versuchsbalken B1) und  $F = 400 \text{ kN}$  (Versuchsbalken B3) wurden die ersten Schubrisse beobachtet. Die Schubrisse traten zwischen der 0,93-fachen und 1,70-fachen Dekompressionslast auf. Diese trotz gleicher Betongüte verhältnismäßig große Bandbreite zwischen der kleinsten und größten Erstschubrißlast ist neben der unterschiedlichen Querschnittsausbildung und dem unterschiedlichen Vorspanngrad im wesentlichen auf die naturgemäß stark streuende Zugfestigkeit des Betons zurückzuführen.

Die rechnerischen Hauptzugspannungen infolge der Erstschubrißlast liegen zwischen  $1,91 \text{ N/mm}^2$  (Versuchsbalken B0) und  $2,28 \text{ N/mm}^2$  (Versuchsbalken B3) und sind damit größer als die gem. DIN 4227 Teil 6 bzw. Teil 1 im Gebrauchszustand für beschränkte Vorspannung (zul  $\sigma_I = 1,8 \text{ N/mm}^2$ ) und für volle Vorspannung (zul  $\sigma_I = 0,8 \text{ N/mm}^2$ ) zulässigen rechnerischen Hauptzugspannungen.

Die ersten Biegerisse wurden zwischen der 1,09-fachen Dekompressionslast (Versuchsbalken B3) und der 1,66-fachen Dekompressionslast (Versuchsbalken B1) beobachtet. Die zugehörigen rechnerischen Biegezugspannungen lagen zwischen  $2,08 \text{ N/mm}^2$  (Balken B1) und  $2,83 \text{ N/mm}^2$  (Versuchsbalken B0) und sind somit etwa gleich groß wie die an den Begleitkörpern festgestellten Biegezugfestigkeiten von  $2,30 \text{ N/mm}^2$  bis  $2,90 \text{ N/mm}^2$ .



Nach der ersten Belastungsphase folgte eine Standzeit von ca. 15 Stunden unter der maximalen Versuchslast der ersten Versuchsphase.

Vor Beginn der 3. Versuchsphase wurden - wie bereits erwähnt - an den Balken zusätzliche Setzdehnungsmeßstellen angebracht, deren Lage und Neigung dem jeweiligen Schubrißverlauf angepaßt wurde. Somit konnten zusätzlich zu den bereits vorhandenen Meßwerten (Meßbrosetten) die Stauchungen der Betondruckstreben unmittelbar bestimmt werden. Um mit den neuangebrachten Setzdehnungsmeßstellen die gesamten Betonstauchungen infolge der Versuchslast bestimmen zu können, wurden die Balken B0, B1 und B2 entlastet und nach der "Nullmessung" in wenigen Schritten auf die vorher erreichte Last hochgefahren.

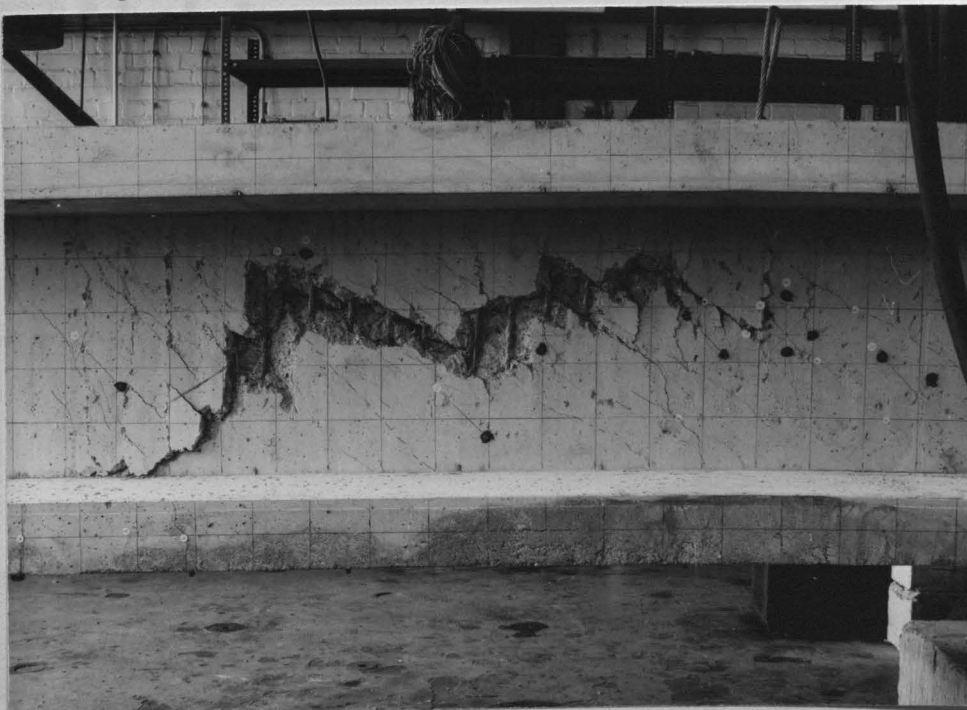
Nachfolgend wurde in der 3. Versuchsphase die Belastung statisch stufenweise bis zum Bruch gesteigert. Bei den hier geprüften 4 Versuchskörpern traten 3 verschiedene Brucharten auf :

- Betondruckstrebenbruch (Versuchsbalken B0 und B2)
- Druckstrebenbruch in Verbindung mit Überschreiten der Betondruckfestigkeit in der vorgedrückten Zugzone in der Nähe des Auflagers (Versuchsbalken B3 mit T-förmigen Querschnitt)
- Schubzugbruch durch Versagen der Bügelbewehrung (Versuchsbalken B1)

Bei den Balken B0 und B2 trat der Bruch durch Überschreiten der Druckfestigkeit in den Stegdruckstreben (Bild 4.2) ein. Das Versagen kündigte sich in beiden Fällen durch eine Schollenbildung an den Stegaußenflächen an. Die erreichten Bruchlasten lagen bei 675 kN (Balken B0) und 800 kN (Balken B2). Die geringere Bruchlast des Versuchsbalkens B0, dessen Spannglieder im Verbund lagen, im Vergleich zu Balken B2 mit verbundlos geführten Spanngliedern erklärt sich durch die geringere Betondruckfestigkeit des Balkens B0 (vergl. Tabelle 2.1). Berücksichtigt man, daß die Prismen-

druckfestigkeit des Balkens B0 nur rd. 77 % der Prismen-  
druckfestigkeit von Balken B2 beträgt, erhält man unter  
der Annahme einer linearen Abhängigkeit der Bruchlast  
von der Prismendruckfestigkeit, für den Versuchsbalken B0  
eine Bruchlast von 877 kN.

Bei Balken B3 trat ein Betondruckbruch (Bild 4.3) in der  
vorgeprägten Zone des Auflagerbereichs bedingt durch eine  
gleichzeitige Druckbeanspruchung infolge der Fachwerk-  
druckstreben und der am Auflager eingeleiteten Vorspann-  
kräfte auf. Der Querschnitt des Versuchsbalkens B3 war im  
Gegensatz zu den übrigen Versuchskörpern als T-Querschnitt  
ausgeführt und besaß somit in der vorgeprägten Zugzone  
nur eine verhältnismäßig kleine Übertragungsfläche.  
Eine Entlastung dieses Versagensbereichs durch eine stärkere  
Auffächerung der Spannglieder im Verankerungsbereich und  
eine hiermit verbundene zum Auflager hin ansteigende Spann-  
gliedachse wurde bewußt nicht gewählt, da zu erwarten war,  
daß durch die vertikalen Komponenten der geneigten  
Spannglieder merkbare Anteile der Querkraft abgebaut  
werden. Es ist zu beachten, daß im Versagenszustand  
die Tragfähigkeit der Biegedruckzone ebenfalls annähernd  
erschöpft war. Die maximale Stauchung am oberen Druckrand  
betrug weit über 2 ‰.



**Bild 4.2** : Bruchbereich des Versuchsbalkens B2  
(Versagen der Druckstreben)

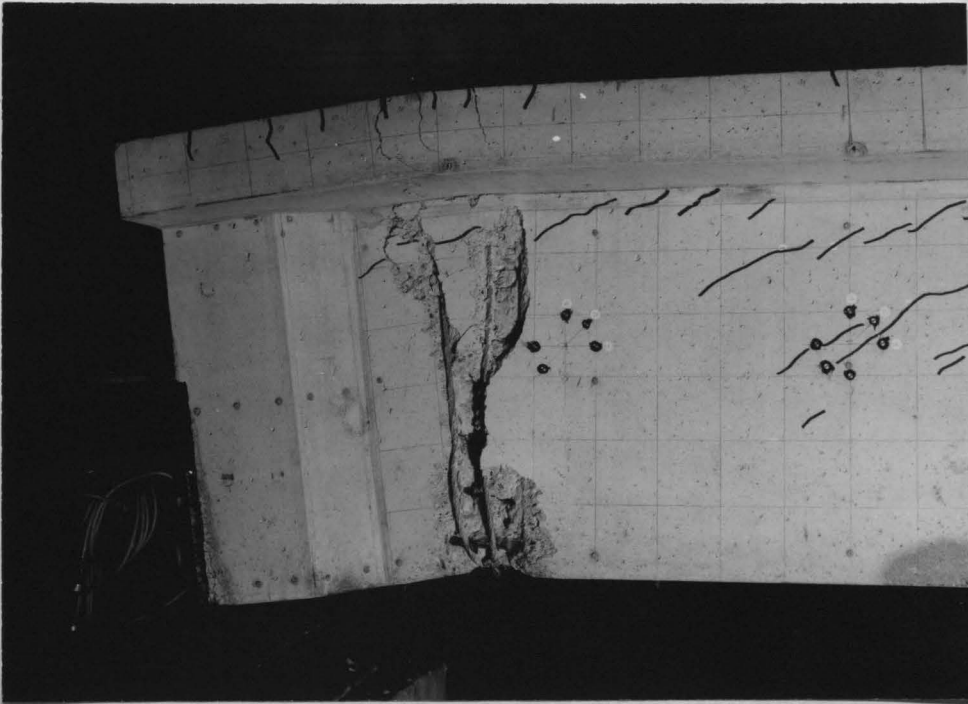


Bild 4.3 : Bruchbereich des Versuchsbalkens B3  
(Betondruckbruch in der vorgedrückten Zone  
im Auflagerbereich)

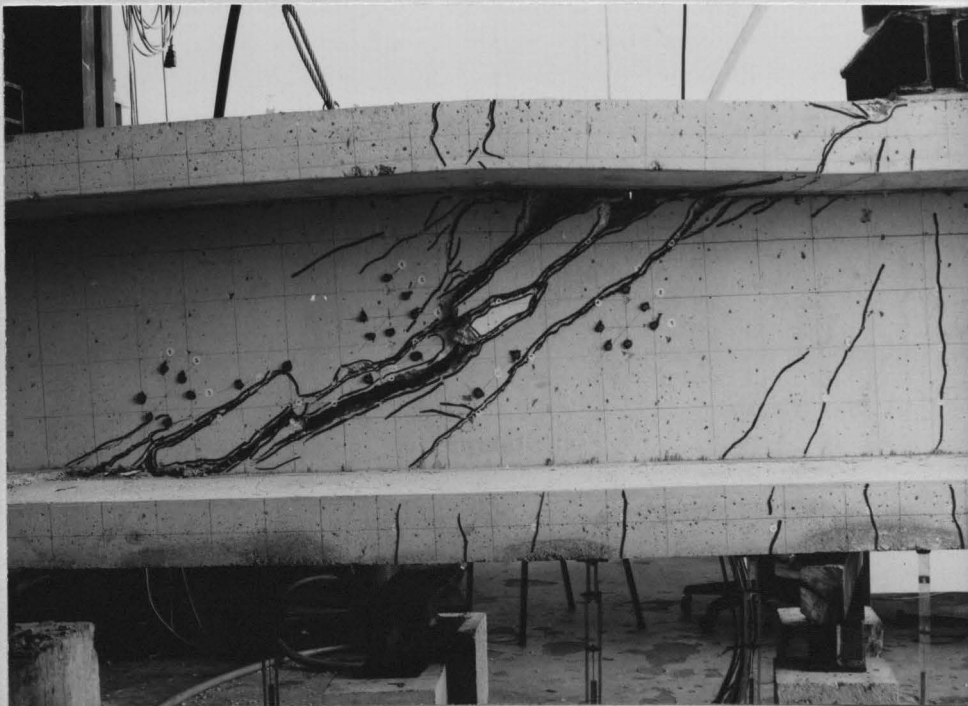


Bild 4.4 : Druckbereich des Versuchsbalkens B1  
(Schubzugbruch)

Die Bruchursache bei Balken B1 war ein Versagen der Bügelbewehrung (Schubzugbruch, Bild 4.4). Als Versuchsparameter wurde bei allen Versuchsbalken - wie bereits erwähnt - der Schubbewehrungsgrad variiert und in der Mehrzahl der Fälle zwei Balkenbereiche mit unterschiedlichem Schubbewehrungsgrad ausgebildet. Die linke Balkenhälfte des Versuchsbalkens B1, in der das Versagen durch Fließen der Bügel eintrat, besaß den geringsten Schubbewehrungsgrad  $\mu_s = 0,13 \%$ . Die ersten Schubrisse traten in beiden Balkenhälften bei einer Versuchslast von  $F = 250 \text{ kN}$  auf. Bei weiterer Belastung zeigte sich jedoch ein unterschiedliches Verhalten der beiden Balkenhälften. Neben einem stärkeren Anstieg der Schubrißbreiten war eine wesentlich größere Beanspruchung der Bügel im schwach schubbewehrtem Bereich festzustellen. Bei 67% der Bruchlast erreichten die Bügel in der linken Balkenhälfte die Streckgrenze, während sie im rechten Bereich mit  $\mu_s = 2,09\%$  auch im Versagenszustand unterhalb der Streckgrenze blieben.

Zur besseren Übersicht sind in der Tabelle 4.1 die wesentlichsten experimentellen Versuchsdaten aller Balken sowie einige zugehörige rechnerische Vergleichsergebnisse einander gegenübergestellt, auf die im Verlauf der weiteren Betrachtungen noch näher eingegangen wird.

Versuchsbalken	B0	B1	B2	B3
Auftreten der ersten Biegerisse bei F [kN]	550	225	400	385
Zugeh. Dekompressions-Last in kN	374	138	306	354
Zugeh. Biegezugrand-Spannung in N/mm <sup>2</sup>	2,83	2,08	2,18	2,38
Biegezugfestigkeit $\beta_{Bz}$ der Begleitkörper in N/mm	2,3	2,3	2,9	2,9
Auftreten der ersten Schubrisse bei F [kN]	350	250	350	400
Zugeh. Dekompressions-Last in kN	374	147	297	354
Zugeh. rechn. Hauptzug-Spannung in N/mm <sup>2</sup>	+1,91	+1,98	+2,17	+2,28
Spaltzugfestigkeit $\beta_{sz}$ der Begleitkörper in N/mm <sup>2</sup>	1,8	1,9	2,3	1,9
Mittlere Neigung der Schubrisse				
a) schwach verbügelte Balkenhälfte	35°	29°	35°	30°
b) stark verbügelte Balkenhälfte	35°	36°	36°	33°
Mittlere Neigung der rechn. Hauptdruckspannungen unter Erstrißlasten (Zustand I)	33°	38°	36°	35°
experimentelle Bruchlast in kN	675	450	800	675

Tabelle 4.1 : Versuchs- und rechnerische Vergleichsdaten der Balken B0 - B3

## 5. DARSTELLUNG UND AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

### 5.1 Allgemeines

Die während der Durchführung dieser Versuche gewonnenen Meßdaten (vergl. Abschnitt 3.1) sind im Anhang systematisch ausgewertet und zusammengefaßt (Anlagen A 6.1 - A 6.16).

In diesem Anhang befinden sich in tabellarischer und graphischer Darstellung die laststufenweise gemessenen Beton-, Bügel- und Spannstahldehnungen, die Balkendurchbiegungen sowie die ermittelten Schubrißbreiten.

Wegen des großen Umfanges werden im folgenden nicht sämtliche Versuchsdaten diskutiert, sondern werden nur die allgemein gültigen Erkenntnisse herausgestellt und anhand von Versuchsdaten belegt.

### 5.2 Balkendurchbiegungen

Die Durchbiegung der Versuchsbalken wurde mittels induktiver Weggeber an den in Anlage A 3.6 dargestellten insgesamt sieben Meßpunkten laststufenweise bestimmt.

Für ausgewählte Belastungsstufen sind die hier gemessenen Werte zu Biegelinien ausgewertet und in den Bildern 5.1 bis 5.4 dargestellt.

Ein Vergleich der Biegelinien zeigt, daß sich der unterschiedliche Schubbewehrungsgrad der beiden Balkenhälften auf die Symmetrie der Biegelinie im Zustand II auswirkt. So ist beim Balken B1 mit einer stark unterschiedlichen Schubbewehrung (linke Balkenhälfte mit einem Schubbewehrungsgrad von  $\mu_s = 0,18\%$ , rechte Balkenhälfte mit  $\mu_s = 2,09\%$ ) die Durchbiegung in der schwach bewehrten Seite etwa 35% größer als im stark bewehrten Bereich.

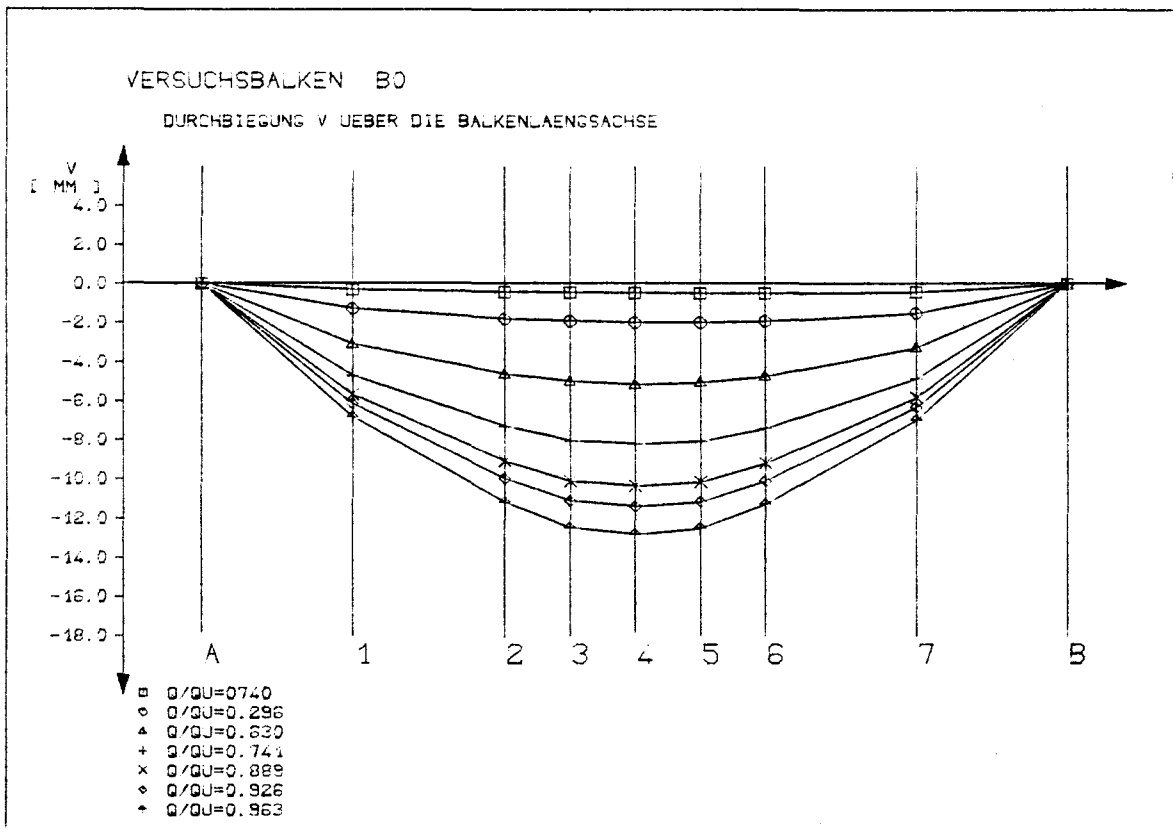


Bild 5.1: Biegelinien Versuchsbalken B0

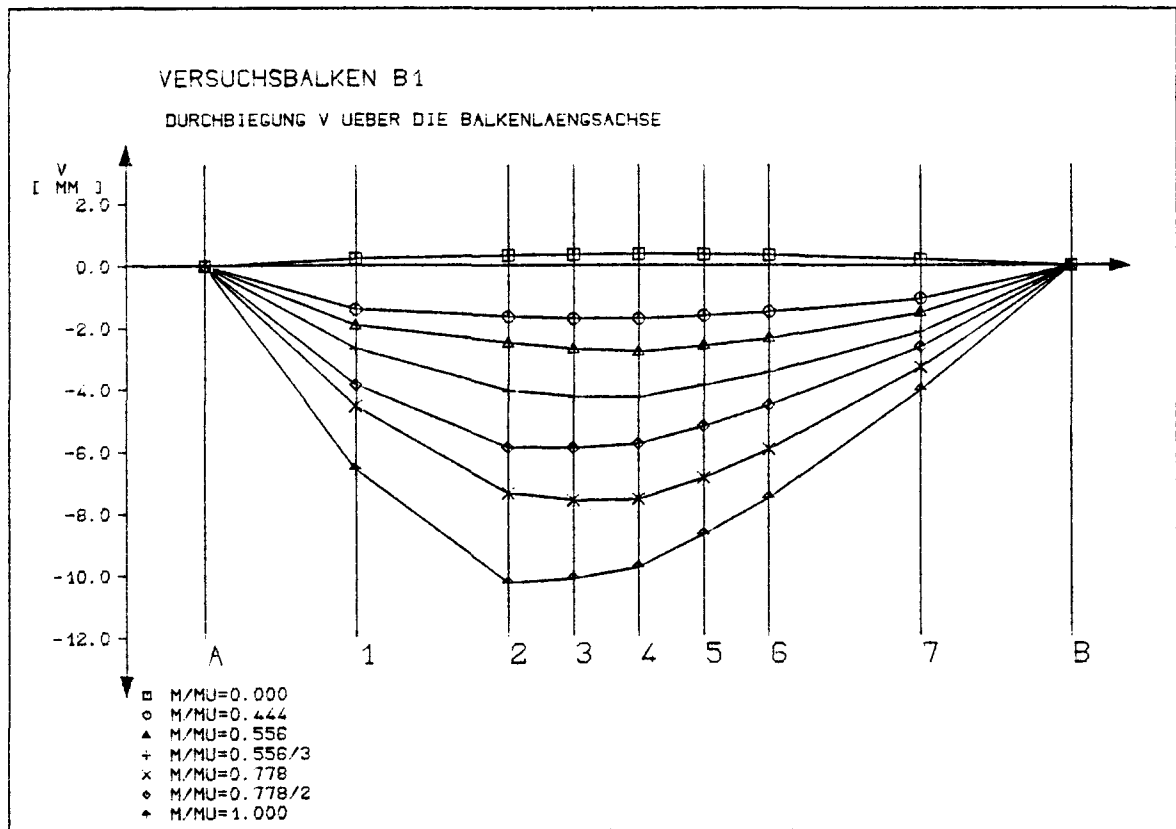


Bild 5.2: Biegelinien Versuchsbalken B1

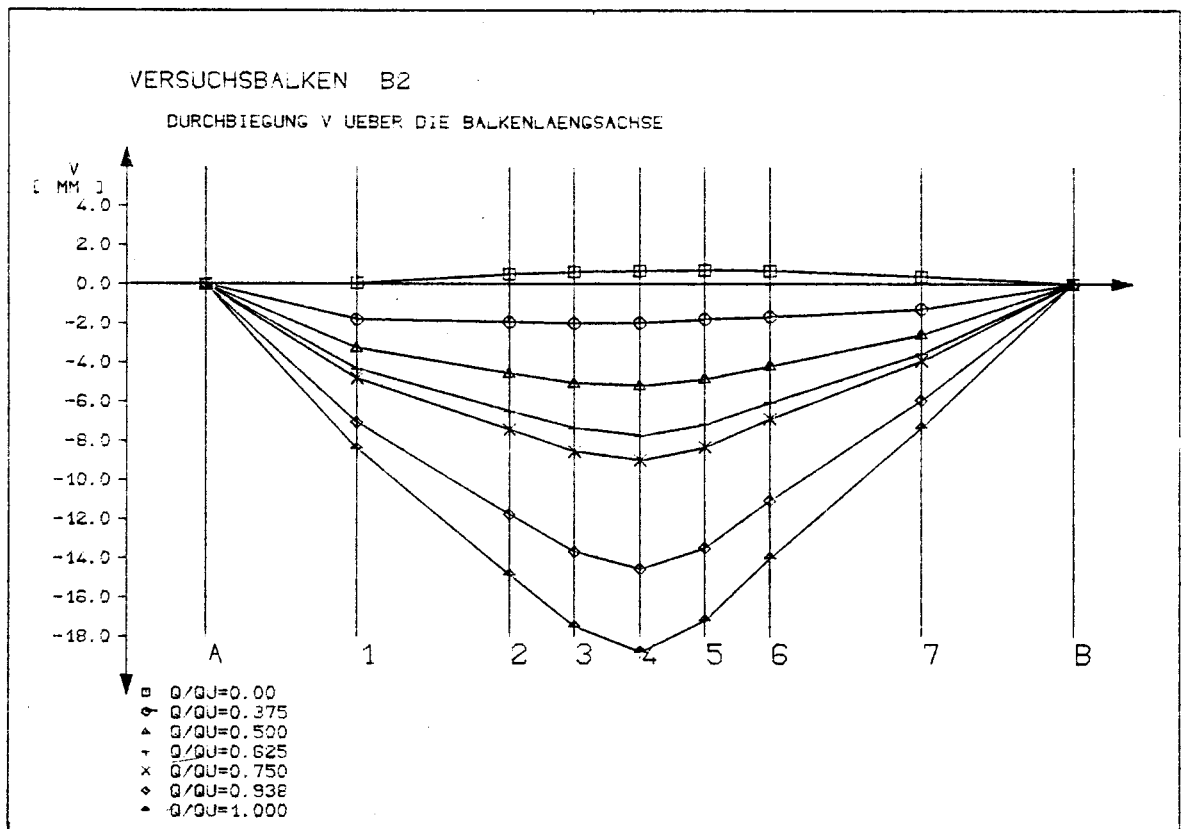


Bild 5.3 : Biegelinien Versuchsbalken B2

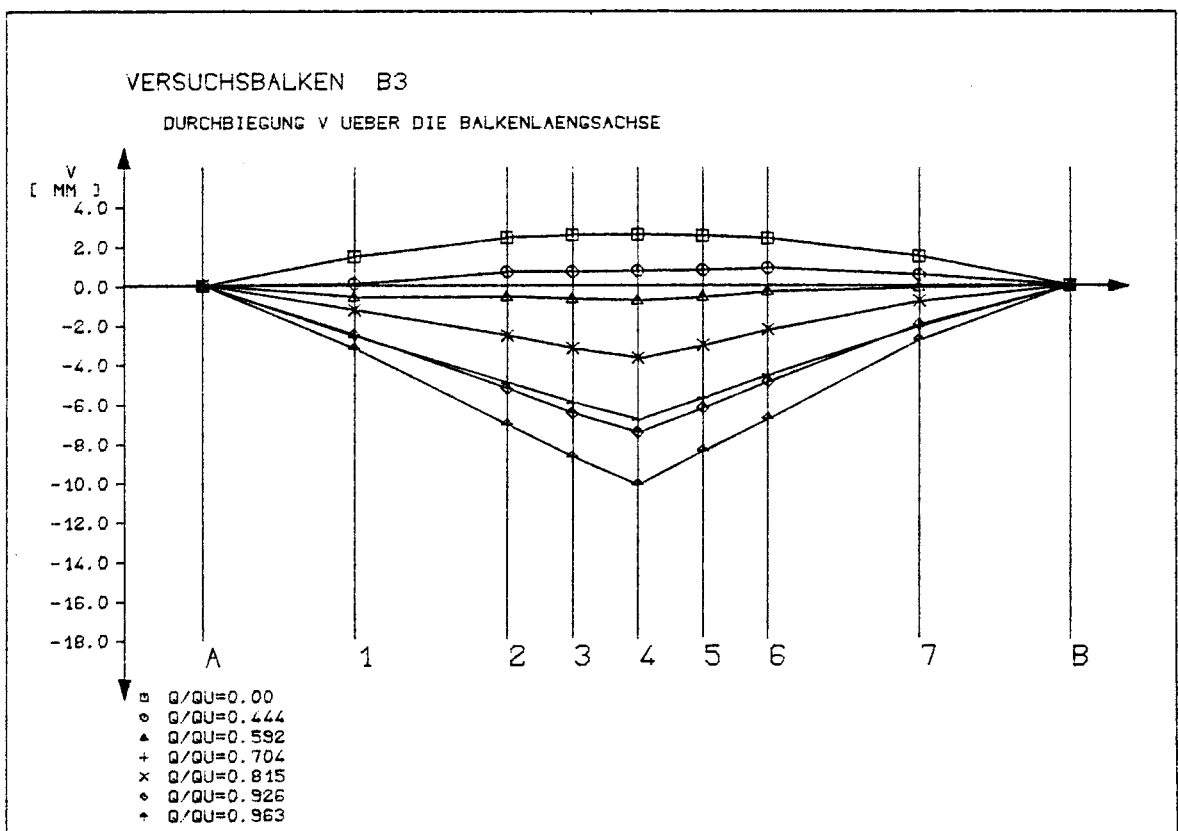


Bild 5.4: Biegelinien Versuchsbalken B3



Bei der rechnerischen Kontrolle zur Interpretation der gemessenen Durchbiegungen müssen im vorliegenden Fall wegen der großen Schubschlankheit und der hohen Querkraftbeanspruchung die Durchbiegungsanteile aus Biege- und Schubverformungen überlagert werden.

Die Balkendurchbiegungen infolge der einwirkenden Biegebeanspruchung ergeben sich für den ungerissenen Zustand I zu

$$w_{B(x)}^I = \frac{P \cdot \ell^3}{48 EJ} \left( 3 \cdot \frac{x}{\ell} - 4 \frac{x^3}{\ell^3} \right) \quad \text{(Einzellast in Feldmitte)} \quad (5.1)$$

mit

$$x \leq \frac{\ell}{2} \quad (5.2)$$

Hieraus kann die Mittendurchbiegung errechnet werden :

$$f_B^I = \frac{P \ell^3}{48 EJ} \quad (5.3)$$

Die Schubverformungen im Zustand I ergeben sich in allgemeiner Form zu

$$w_{Q(x)}^I = \int \frac{Q(x)}{K_S^I} \cdot dx \quad (5.4)$$

mit

$$K_S^I = G_B \cdot A_S = \frac{E_b}{2(1+\mu)} \cdot A_S$$

$$\approx 0,42 E_b \cdot A_S$$

Die Anpassung an die vorliegenden Randbedingungen liefert mit

$$Q(x) = \frac{P}{2} = \text{const.} \quad (5.6)$$

die Durchbiegung infolge Schubbeanspruchung zu

$$\begin{aligned} f_Q^I = w_{Q(x)}^I \Big|_{x=\ell/2} &= \int_0^{\ell/2} \frac{P}{0,84 \cdot E_b \cdot A_S} \cdot dx \\ &= \frac{P \cdot \ell}{1,68 \cdot E_b \cdot A_S} \end{aligned}$$

Das Verhältnis der Mittendurchbiegungsanteile aus Biege- und Querkraftbeanspruchung kann somit zu

$$\alpha = \frac{f_Q^I}{f_B^I} = \frac{48 E_b \cdot J \cdot P \cdot l}{P l^3 \cdot 1,68 E_b \cdot A_s} = 28,57 \frac{J}{A_s \cdot l^2} \quad (5.8)$$

bestimmt werden. Nach Einsetzen der Festwerte zeigt sich, daß die Durchbiegungen infolge der Schubbeanspruchung im reinen Zustand I (d.h. weder Biege- noch Schubrisse) immerhin 54% der Durchbiegung infolge der Biegebeanspruchung betragen.

Die Schubverformungen nach Zustand II ergeben sich für das parallelgurtige Fachwerk ohne Beteiligung der Gurte an der Querkraftaufnahme über

$$w_{Q(x)}^{II} = \int_0^x \frac{Q(x)}{K_S^{II}} dx \quad (5.9)$$

mit  $K_S^{II}$  gemäß /20/

$$K_S^{II} = b_0 \cdot z \cdot \frac{\mu_s \cdot E_b \cdot E_s \cdot \sin^4 \alpha \cdot \sin^4 \beta (\cot \alpha + \cot \beta)^2}{E_b \cdot \sin^4 \beta + E_s \cdot \mu_s \cdot \sin^4 \alpha} \quad (5.10)$$

Diese Gleichung zur Ermittlung der mittleren Schubsteifigkeit im Zustand II vernachlässigt neben dem Einfluß der Mitwirkung des gerissenen Betons auf Zug auch den Einfluß der Kornverzahnung und die Auswirkung der Dübelwirkung der Längsstäbe. In Gleichung (5.10) wurden die an den Begleitkörpern bestimmten Werte für den E-Modul und die aus den gemessenen Betonverformungen berechneten mittleren Betondruckstrebenneigungen  $\beta$  eingesetzt. Die Neigung der Bügelbewehrung betrug für alle Balken  $\alpha = 90^\circ$ . Die Auswertung der Gleichung (5.10) und deren Vergleich mit Gleichung (5.5) zeigt, daß die Schubsteifigkeit  $K_S^{II}$  auf 15% (Balken B1 mit einem Bügelbewehrungsgehalt  $\mu_s = 0,18\%$ )

bis 47 % (Balken B0 mit  $\mu_s = 3,01\%$ ) der Schubsteifigkeit  $K_s^I$  nach Zustand I abfällt; i.M. fiel die Schubsteifigkeit auf 38% der Schubsteifigkeit nach Zustand I ab. Die verringerte Biegesteifigkeit im Zustand II wurde für die einzelnen Versuchsbalken näherungsweise zu 35% bis 50% der Biegesteifigkeit nach Zustand I ermittelt.

In den Anlagen A 5.1 und A 5.2 sind die in Balkenmitte (Meßstelle 5) gemessenen Durchbiegungen in Abhängigkeit von der aufgetragenen Versuchslast aufgetragen und den unter Annahme des Zustands I bzw. Zustand II berechneten Durchbiegungen gegenübergestellt. Trotz der sehr vereinfachten Rechenannahmen zeigen die berechneten und gemessenen Mittendurchbiegungen annehmbare Übereinstimmung.

### 5.3\_Rißentwicklung

#### 5.3.1 Allgemeines

Bei jedem Versuchsbalken wurde laststufenweise die Entwicklung der Biege- und Schubrisse aufgezeichnet; die Rißbilder aller 4 Balken sind in den Anlagen A 2.1 bis A 2.4 und die Rißentwicklung für einige ausgewählte Laststufen in den Anlagen A 2.5 bis A 2.8 wiedergegeben. In diesen Anlagen sind auch die nach abgeschlossener Schubrißbildung zur Messung der Druckstrebenstauchungen zusätzlich angeordneten Setzdehnungsmeßstellen aufgeführt; ebenso sind hier die Punkte angegeben, an denen die Rißbreiten gemessen wurden.

#### 5.3.2 Erstrißlasten

In der Tabelle 4.1 sind neben anderen Versuchsdaten auch die äußeren Lasten angegeben, bei denen die ersten Schub- bzw. Biegerisse beobachtet wurden. Gleichzeitig sind die zugehörigen rechnerischen Hauptzug- bzw. Biegezugspannungen nach E-Theorie aufgeführt. Bedingt durch die Unterschiede in Querschnittsbildung und Vorspanngrad und die naturgemäß große Streuung der

Betonzugfestigkeit traten erste Schubrisse zwischen der 0,93-fachen (Versuchsbalken B0) und der 1,70-fachen Dekompressionslast (Versuchsbalken B1) auf. Die zugehörigen rechnerischen Hauptzugspannungen liegen zwischen  $1,91 \text{ N/mm}^2$  (Versuchsbalken B0) und  $2,28 \text{ N/mm}^2$  (Versuchsbalken B3); somit sind die am Bauteil vorhandenen Zugfestigkeiten annähernd gleichgroß wie die an den Begleitkörpern gewonnenen Festigkeiten. Die rechnerischen Hauptzugspannungen beim Auftreten erster Schubrisse liegen bei allen geprüften Versuchskörpern oberhalb der nach DIN 4227 Teil 1 zulässigen Hauptzugspannungen von  $1,8 \text{ N/mm}^2$  für B 25.

Die während der Versuche gegenüber der horizontalen Achse gemessenen Neigungswinkel der ersten Schubrisse lagen zwischen  $29^\circ$  und  $36^\circ$  und waren durchweg größer als die bei Ansatz der Erstschubrißlast unter Annahme von Zustand I ermittelten rechnerischen Neigungswinkel (vergl. Tabelle 4.1).

Zwischen der 1,09-fachen (Versuchsbalken B3) und der 1,66-fachen Dekompressionslast (Versuchsbalken B1) traten in den Zugzonen der Versuchskörper im Bereich maximaler Biegemomentenbeanspruchung erste Biegerisse auf. Die große Streuung des Verhältnisses Biegeriðlast zu Dekompressionslast erklärt sich durch die unterschiedlichen Vorspanngrade und Querschnittsausbildungen. Der Versuchsbalken B1 besaß beim Auftreten der ersten Biegerisse den mit Abstand geringsten, der Balken B3, bedingt durch seine Querschnittsform (T-Querschnitt), den größten Vorspanngrad. Die zugehörigen rechnerischen Biegezugspannungen liegen zwischen  $2,08 \text{ N/mm}^2$  (Versuchsbalken B1) und  $2,83 \text{ N/mm}^2$  (Versuchsbalken B0) und sind annähernd gleichgroß wie die an den Begleitkörpern festgestellten Biegezugfestigkeiten von  $2,30 \text{ N/mm}^2$  bis  $2,90 \text{ N/mm}^2$ .

### 5.3.3 Schubrißbreiten

Im Hinblick auf eine dauerhafte Gebrauchsfähigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen ist es nicht nur notwendig, geeignete Maßnahmen zur Begrenzung auftretender Biegerisse zu ergreifen, sondern auch im Hinblick auf die Gebrauchsfähigkeit wünschenswert, Aussagen über das Verhalten auftretender Schubrisse zu gewinnen.

Zur Begrenzung auftretender Schubrisse sind auch deshalb besondere Maßnahmen zu ergreifen, da im Gegensatz zu Biegerissen, wo die Biegezugbewehrung in der Regel senkrecht zur Rißrichtung verläuft, die Schubrisse von der einliegenden Schubbewehrung meist unter einem Winkel  $\alpha < 90^\circ$  gekreuzt werden.

Im folgenden sollen deshalb die während der Durchführung gemessenen Schubrißbreiten ausgewertet und die daraus herleitbaren Ergebnisse diskutiert werden.

In der Anlage A 5.3 ist die laststufenweise Entwicklung der Schubrißbreiten anhand ausgewählter Laststufen zusammengestellt. Die gemessenen Erstschubrißbreiten aller Versuchsbalken betrugen zwischen 0,03 und 0,47 mm. In den Stegbereichen mit stärkerer Verbügelung ( $\mu_s \geq 1,34\%$ ) lagen die gemessenen Erstschubrißbreiten einheitlich zwischen 0,03 und 0,12 mm, in der schwach verbügelten Balkenhälfte des Balkens B1 mit  $\mu_s = 0,18\%$  traten schon unter der Erstrißlast Schubrißbreiten von bis zu 0,47 mm auf. Bei den maximalen Schubrißbreiten kurz vor Erreichen der Bruchlast waren die Verhältnisse ähnlich: In den stark verbügelten Stegbereichen lagen die maximalen Schubrißbreiten zwischen 0,18 (Versuchsbalken B3) und 0,34 mm (Versuchsbalken B0). Im schwach verbügelten Steg des Balkens B1 ( $\mu_s = 0,18\%$ ) wurde vor Erreichen der Bruchlast eine max. Schubrißbreite von 1,61 mm gemessen.

Ein Vergleich der Schubrißbreiten des Vergleichsbalkens BO mit Verbund und der Balken B2 und B3 mit Vorspannung ohne Verbund zeigt, daß sich die Rißbreiten bei einer starken Verbügelung des Steges unabhängig von der Art des Verbundes der Spannbewehrung einstellen.

Die hier gemessenen Schubrißbreiten überschritten selbst kurz vor Erreichen der Bruchlast die im Hinblick auf eine dauerhaft befriedigende Gebrauchsfähigkeit als zulässig anzusehende Schubrißbreite von  $w=0,20$  mm nur geringfügig (vergl. Bild 5.5). Dagegen überschritten bei schwacher Verbügelung die ersten Schubrisse schon die als zulässig angesehene Rißbreite.

Ein unmittelbarer Vergleich mit einem vorgespannten Balken mit Verbund und geringer Schubbewehrung kann hier nicht erfolgen.

Der Einfluß der in der Zugzone eingelegten Betonstahlbewehrungsmenge auf die Schubrißbildung konnte nicht erfaßt werden; allenfalls dürfte die Rißneigung beeinflußt werden.

#### 5.3.4 Biegeriðbreiten

Die gemessenen max. Biegeriðbreiten in Höhe der Spannbewehrung lagen zwischen 0,13 mm (Versuchsbalken B1) und 2,54 mm (Versuchsbalken B3). Ein Vergleich der Riðbilder (Anhang A 2.1 bis A 2.4) zeigt deutlich den Einfluß der im Verbund liegenden Längsbewehrung auf die Riðentwicklung:

Beim Versuchsbalken B3 mit nur einem Betonstahl  $\varnothing 6$  als Längsbewehrung in der Zugzone bildete sich nur ein Biegerið, der sich bei weiterer Laststeigerung rasch öffnete und schon bald bis in den Biegedruckflansch hineinreichte. Im Laufe der Versuchsdurchführung war es erforderlich, die Vorspannung zweimal durch Nachspannen zu erhöhen, um einen vorzeitigen Biegebruch durch Einschnürung der Druckzone zu verhindern. Ein Vergleich der Balken B2 (Längsbewehrung 8  $\varnothing 6$ )

und B1 (8 Ø 10) zeigt, daß mit steigender Betonstahl-längsbewehrung die Zahl der Biegerisse und die Länge der gerissenen Biegezugzone zunimmt, während die mittlere Rißbreite abnimmt. Der Vergleichsbalken B0 zeigte infolge der hohen Vorspannung erst kurz vor Eintreten des Druckstrebenversagens die ersten Biegerisse im Zuggurt, die jedoch aufgrund der guten Verbundwirkung im Bereich der max. Momentenbeanspruchung gleichmäßig verteilt waren.

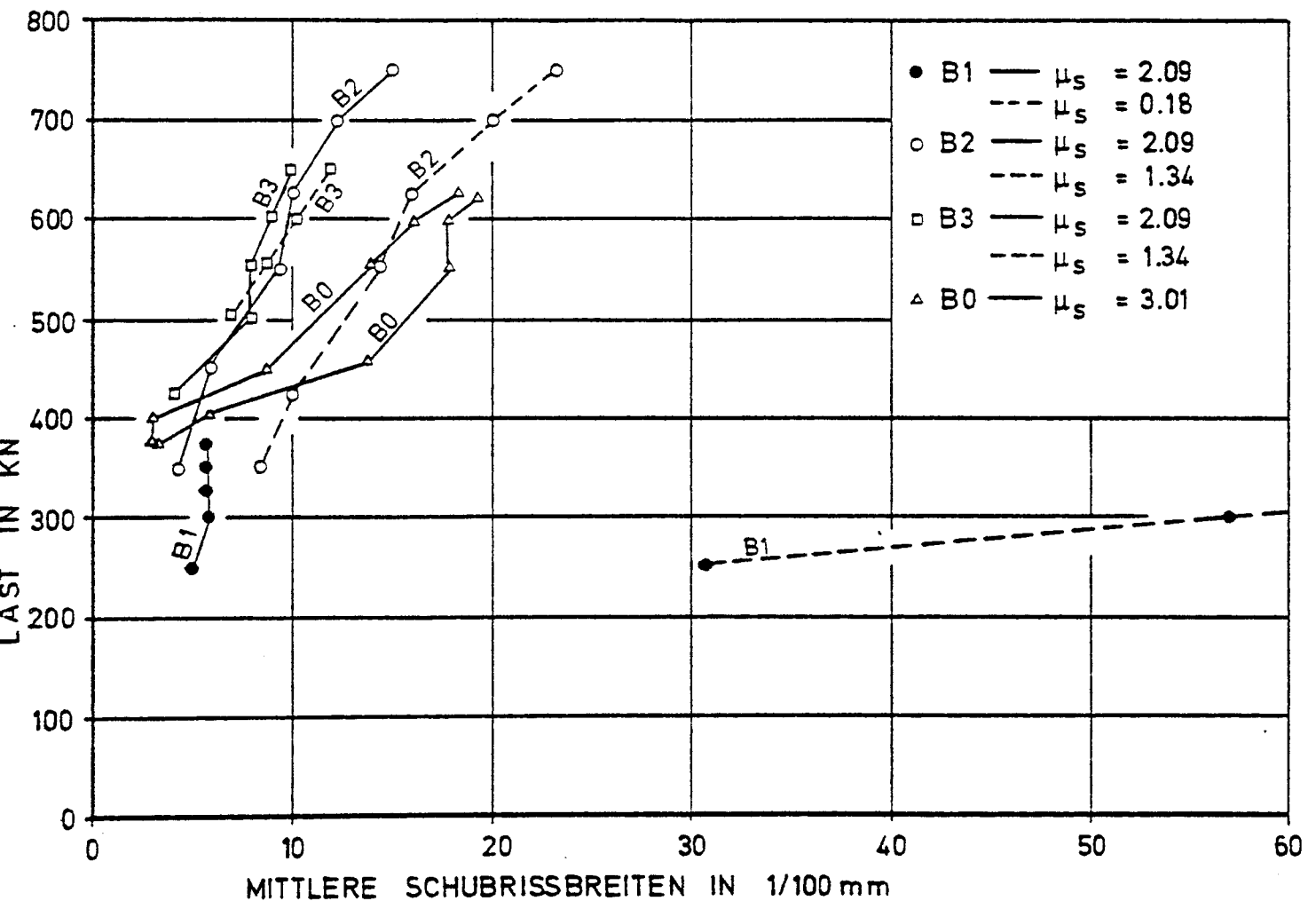


Bild 5.5 : Entwicklung der mittleren Schubrißbreiten

## 5.4 Spann- und Betonstahldehnungen

### 5.4.1 Spannstahldehnungen

In Bild 5.6 sind die Vorspannkraften in Abhängigkeit von den aufgetragenen Versuchslasten aufgetragen. Während beim Vergleichsbalken B0 vor Versuchsbeginn die gesamte Vorspannkraft aufgebracht wurde, erfolgte das Vorspannen der übrigen Versuchsbalken stufenweise. Die Vorspannkraft wurde immer dann erhöht, wenn die Biegerisse in Feldmitte bis an den Druckflansch heranreichten, um so einen vorzeitigen Biegebruch durch Einschnürung der Druckzone zu verhindern.

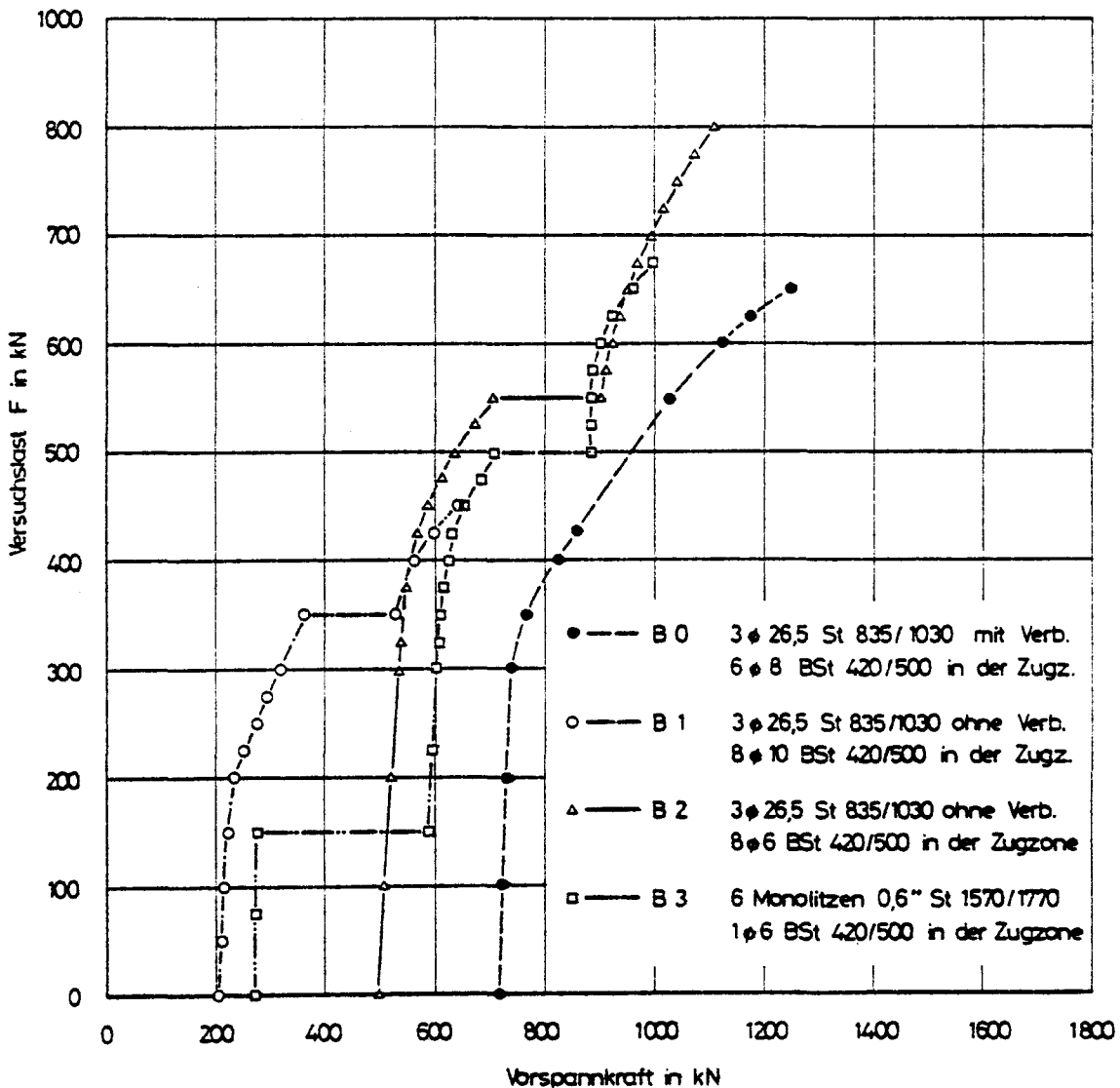


Bild 5.6 : Zunahme der Vorspannkraft infolge der Versuchslasten



Die gemessenen Spannkraftzunahmen lagen zwischen 27% (Versuchsbalken B3) und 64% (Versuchsbalken B0) bezogen auf die durch das Vorspannen aufgebrachte Spanngliedkraft (vergl. Tabelle 5.1). Die für die Spannbetonbauweise ohne Verbund insgesamt hohen Spannkraftzunahmen der Balken B1 bis B3 sind einerseits auf die geringe Spanngliedlänge von  $\sim 4,30$  m und andererseits auf die hohen Betonstahlbewehrungsanteile in der Zugzone der Balken B1 und B2 und die damit verbundene günstige Rißverteilung zurückzuführen. Der Anteil der Betonstahlbewehrung am Biegebruchmoment betrug für die Balken B1 und B2 34% bzw. 8%. Ein Vergleich der Stauchungen in der Betondruckzone der Versuchsbalken zeigt, daß beim Balken B1 mit einer Randstauchung von  $\varepsilon_b = \sim -1,0\%$  die Biegedrucktragfähigkeit und damit auch die Möglichkeit einer weiteren Spannkraftzunahme noch nicht erschöpft war. Bei den Balken B2 und B3 mit einer maximalen Randstauchung von  $\varepsilon_b = -2,4 \text{ ‰}$  und  $\varepsilon_b = -2,1 \text{ ‰}$  lag die Biegetragfähigkeit nur wenig oberhalb der Schubtragfähigkeit. Demgegenüber besaß der Vergleichsbalken B0 noch ausreichende Tragreserven gegenüber einem Biegebruch, da die Biegerisse bei Eintreten des Schubbruches noch nicht bis in den Stegbereich hineinreichten.

Der Vergleich der jeweils im Bruchlastbereich gemessenen maximalen Spannstahldehnungen mit den in Begleitversuchen festgestellten Fließdehnungen (vergl. Tab. 2.3) bestätigt, daß in allen Fällen das Balkenversagen vor Erreichen der Spannstahlfließgrenze eintrat.

Bei den Versuchsbalken B1 und B2 kamen gerippte Spannstäbe  $\emptyset 26,5$  in Hüllrohren  $\emptyset 43$ , die nicht verpreßt wurden, zur Anwendung. Wie das Bild 5.7 zeigt, waren die Spannstahldehnungen über die gesamte Balkenlänge annähernd konstant. Unerwünschte Reibungskräfte haben die Versuchsergebnisse offensichtlich nicht nennenswert beeinflußt. Auch der Vergleich der Summe der Betondehnungen in der Faser der Spannglieder mit den Spannstahldehnungen gibt keine Hinweise auf ungewollte Aufnahme von Differenzkräften in den Spanngliedern durch Reibung (vergl. Bild 5.8).

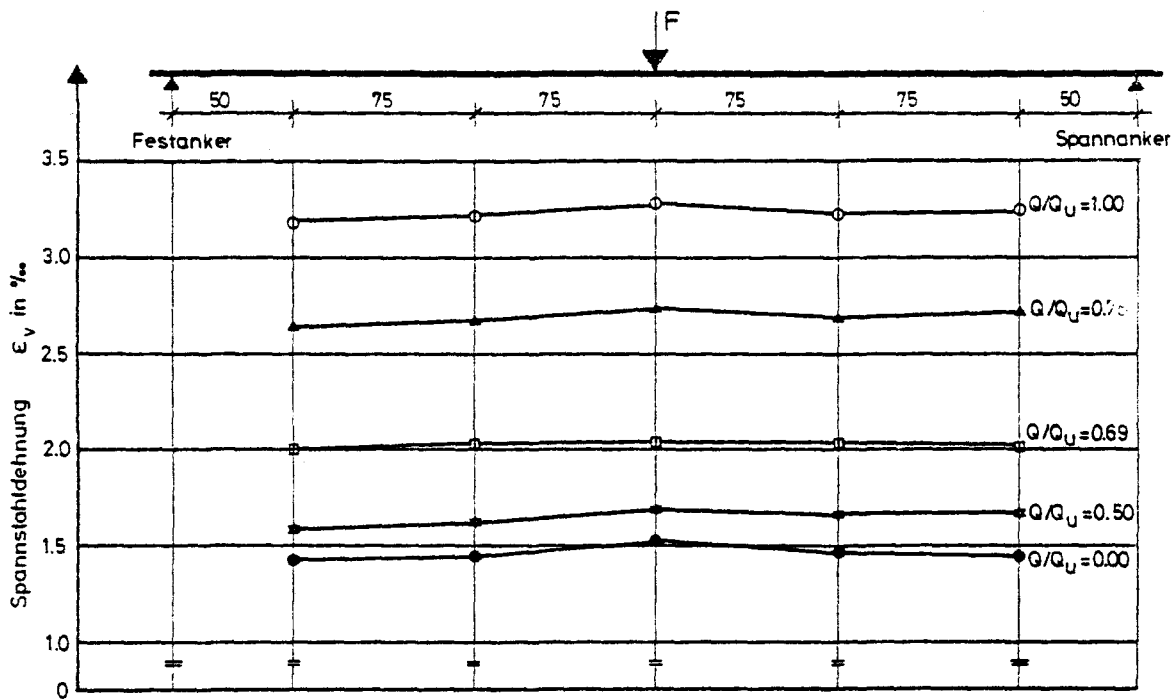


Bild 5.7 : Spannstahldehnungen entlang der Balkenachse (Balken B2)

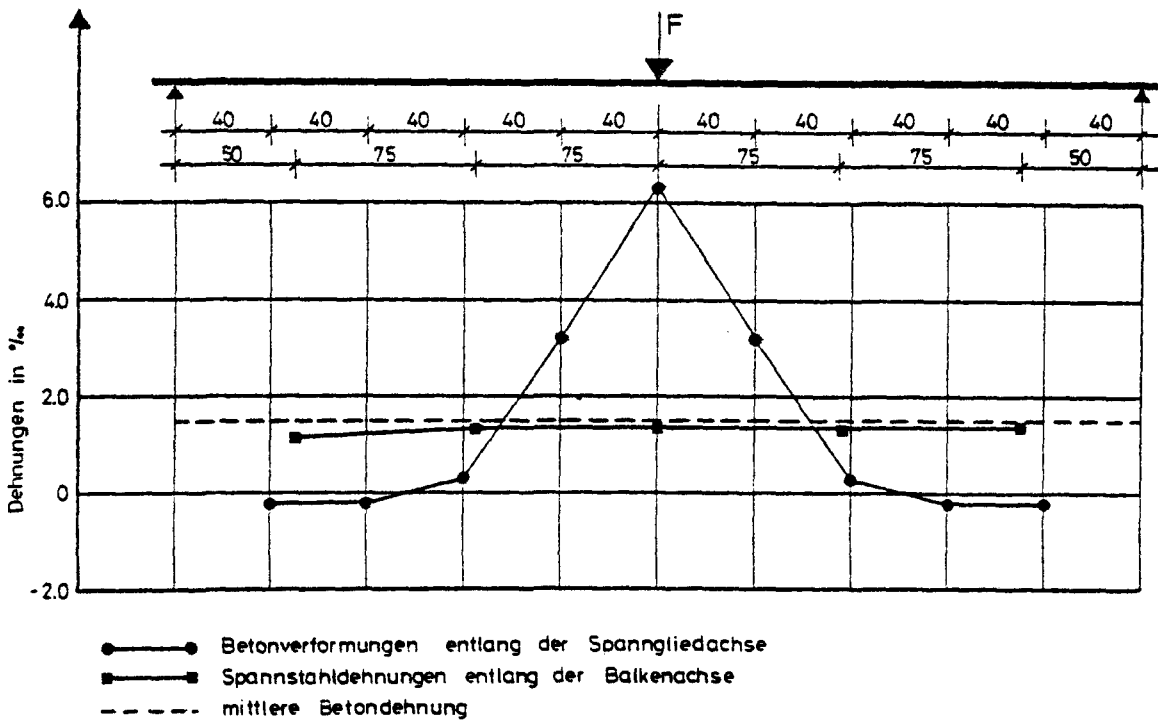


Bild 5.8 : Vergleich der Spannstahldehnungen mit den Betondehnungen in der Faser des Spanngliedes entlang der Balkenachse infolge der Versuchslast  $F$  (Balken B2)

Balken	B 0	B 1	B 2	B 3
Spannkraftzunahme bis zum Schubversagen in kN	470	217	410	210
Spannkraftzunahme in % *	61 %	57 %	58 %	27 %
Spannungszunahme in N/mm <sup>2</sup>	285	131	248	250
gemessene Spanngliedkraft im Bruchzustand	1200	596	1112	994
max. aufnehmbare Spanngliedkraft in kN	1380	1380	1380	1319
zugeh. Stauchung am Biegedruckrand	∕	-10 ‰	-24 ‰	-21 ‰

\* Spannkraftzunahme bezogen auf die durch das Vorspannen aufgebrachte Spanngliedkraft

Tabelle 5.1 : Vorspannkraften und Spannkraftzunahme im Bruchzustand

#### 5.4.2 Dehnungen der Betonstahllängsbewehrung

Neben den Spannstahldehnungen wurden am Balken B2 die Dehnungen der schlaffen Längsbewehrung in der vorgedrückten Zugzone gemessen. Im Bild 5.9 ist der Verlauf der aus den Dehnungen ermittelten Stahlspannungen über die Balkenlänge aufgetragen.

Infolge Vorspannung waren die Betonstahlspannungen in der vorgedrückten Zugzone über die Balkenlängsachse annähernd konstant und stimmten mit den rechnerischen Werten nach E-Theorie gut überein. Mit zunehmender äußerer Belastung wurden diese Druckspannungen vor allem in Feldmitte abgebaut und auf einer Länge von  $\sim 1,50$  m traten hier Zugspannungen auf.

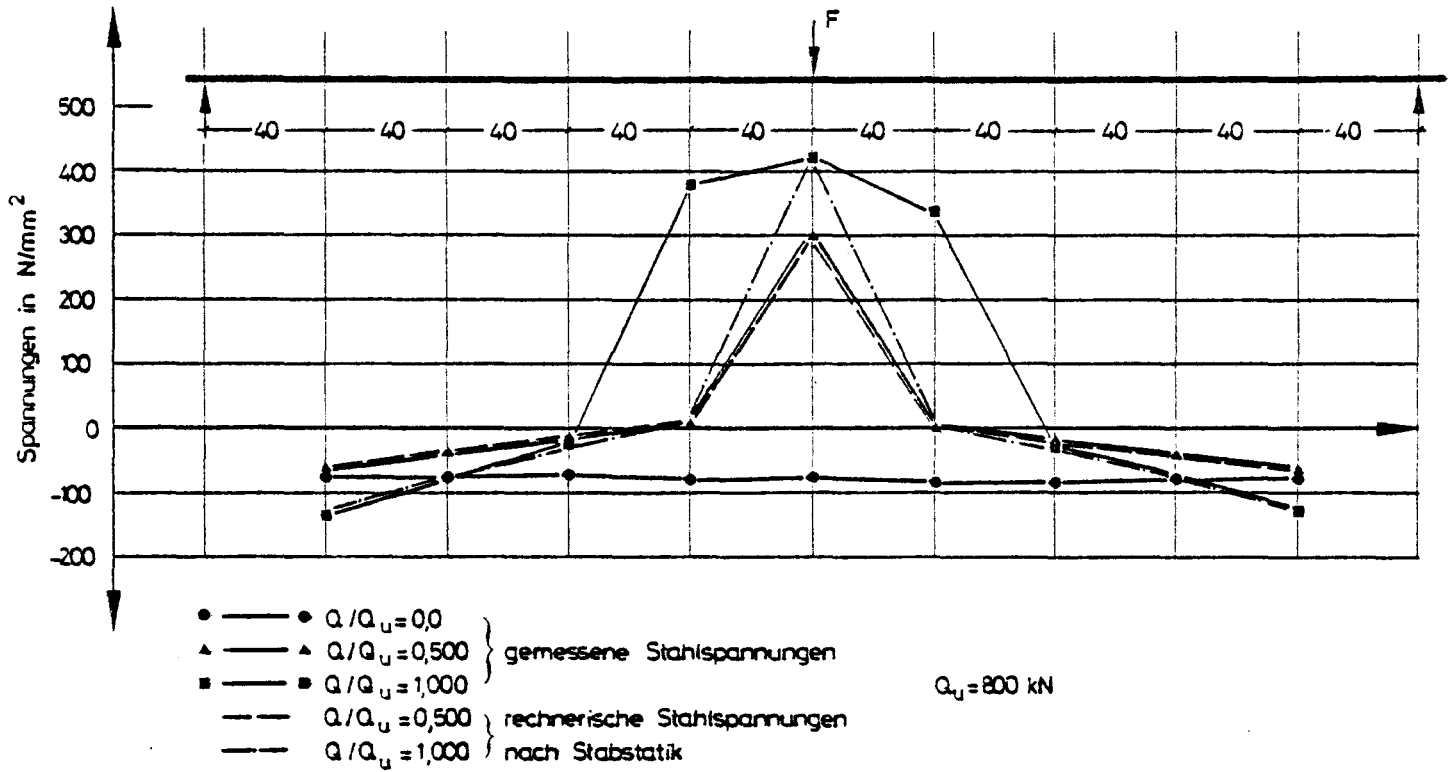


Bild 5.9: Stahlspannung der Betonstahllängsbewehrung in der Zugzone über die Balkenlänge

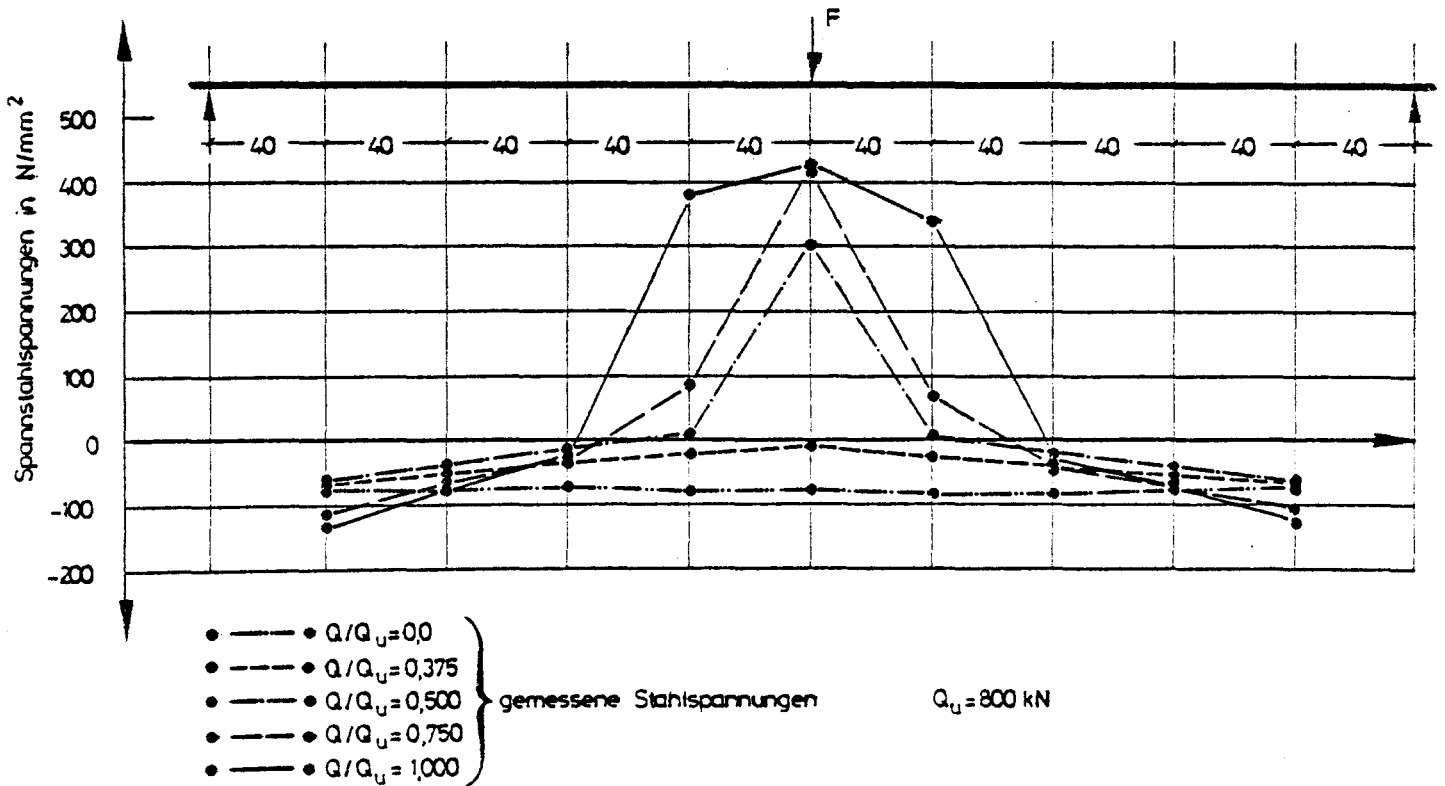


Bild 5.10: Vergleich der rechnerischen und gemessenen Stahlspannungen der Betonstahllängsbewehrung in der Zugzone

Für  $F = 400 \text{ kN}$  ( $Q/Q_u = 0,50$ ) und  $F = 800 \text{ kN}$  ( $Q/Q_u = 1,00$ ) wurden in Bild 5.10 die aus den Meßwerten ermittelten den nach der technischen Biegelehre errechneten Betonstahlspannungen gegenübergestellt.

Der Verlauf der Stahlspannungen, wie er sich aus der technischen Biegelehre ergibt, ist in Bild 5.10 gestrichelt eingezeichnet.

Der Vergleich zeigt, daß für die Laststufe  $Q/Q_u = 0,50$  noch eine gute Übereinstimmung zwischen Meß- und Rechenwerten festzustellen ist, während im Versagenszustand die o.g. Werte vor allem im mittleren gerissenen Balkenbereich stark voneinander abweichen.

Diese Abweichung bezieht sich nicht auf die Größe des Maximalwertes in Feldmitte, der mit dem rechnerischen Wert übereinstimmt, sondern auf den Verlauf der Spannungen in den Abschnitten von 80 cm rechts und links der Balkenmitte. In diesem Bereich waren bei hohen Belastungsgraden sowohl der Zuggurt als auch der Steg gerissen. Die Querkraft wird hier

überwiegend von den Stegdruckstrebenkräften und den Bügeln aufgenommen. Diese Fachwerktragwirkung führt zu einer Zusatzbeanspruchung der Betonstahlbewehrung im Zuggurt, die sich im sogenannten Versatzmaß ausprägt, das aus Bild 5.10 beim Vergleich der Rechen- und experimentellen Werte für  $Q/Q_u = 1,0$  deutlich abzulesen ist. Das Versatzmaß der Stahlspannungslinie beträgt nach Bild 5.10 ca. 40 cm. Dabei ist jedoch zu beachten, daß der Abstand der Meßstellen ebenfalls 40 cm betrug und daher die Bestimmung des Versatzmaßes ziemlich grob ist. Vermutlich wird sich bei feinerer Einteilung der Meßwerte vor allem in Balkenmitte ein größeres Versatzmaß ergeben. Zur genaueren Klärung dieses Sachverhaltes sind weitere Versuche mit einem ausreichend engen Abstand der Stahldehnungsmeßstellen in der vorgedrückten Zugzone erforderlich.

Im Balkenauflagerbereich ist trotz vorhandener Schubrisse im Steg keine aus Schubbeanspruchung herrührende Zugkraft in der Betonstahllängsbewehrung festzustellen. Die Aufnahme der Versatzkräfte erfolgt hier vermutlich durch den ungerissenen vorgedrückten Betonzuggurt.

### 5.4.3 BÜGELDEHNUNGEN

Alle Balken waren mit Dehnmeßstreifen an den Bügeln versehen : An einzelnen ausgewählten Bügeln waren jeweils 3 Meßstellen angeordnet (Anhang Bild A 3.1). Sämtliche Einzelwerte der Dehnungsmessungen sind im Anhang laststufenweise wiedergegeben. Auf den Bildern 5.9 bis 5.12 wurden die Bügelspannungen entlang der Balkenachse für jeweils mehrere Laststufen aufgezeichnet.

Die Bügelbewehrung der beiden Hälften des Balkens B1 war stark unterschiedlich ausgebildet; entsprechend wurde auch eine unterschiedliche Beanspruchung gemessen. In der linken, schwach bewehrten Balkenhälfte ( $\mu_{s,bü} = 0,18\%$ ) erreichten die Bügelspannungen unmittelbar nach Auftreten der ersten Schubrisse die Streckgrenze, während sie im rechten stark bewehrten Bereich ( $\mu_{s,bü} = 2,09\%$ ) wie bei den übrigen Balken unterhalb der Fließgrenze blieben. Grundsätzliche Unterschiede der Bügeltragwirkung konnten zwischen dem Vergleichsbalken B0 und den Versuchsbalken B1 bis B3 nicht festgestellt werden.

Im Bild 5.11 sind die gemessenen mittleren Bügelspannungen den rechnerischen Bügelspannungen unter Zugrundelegung eines  $45^\circ$  Fachwerkes gegenübergestellt. Für geringe Lasten vor Bildung der ersten Schubrisse liegen die gemessenen Bügelspannungen weit unterhalb der rechnerischen Werte. Nach Schubrißbildung stiegen die gemessenen Bügelspannungen steil an und erreichten bzw. überschritten im Bruchbereich die theoretischen Werte. Eine ähnliche Erscheinung wurde ebenfalls von Leonhardt, Koch, Rostásy in /21/ bei der Untersuchung der Schubtragfähigkeit von I-Querschnitten bei Vorspannung mit Verbund festgestellt. Die Überschreitung der rechnerischen Bügelspannungen durch die Meßwerte ist zum Teil auf die mit zunehmender Last steilere Druckstrebenneigung zurückzuführen, woraus sich rechnerisch eine höhere Beanspruchung ergibt.

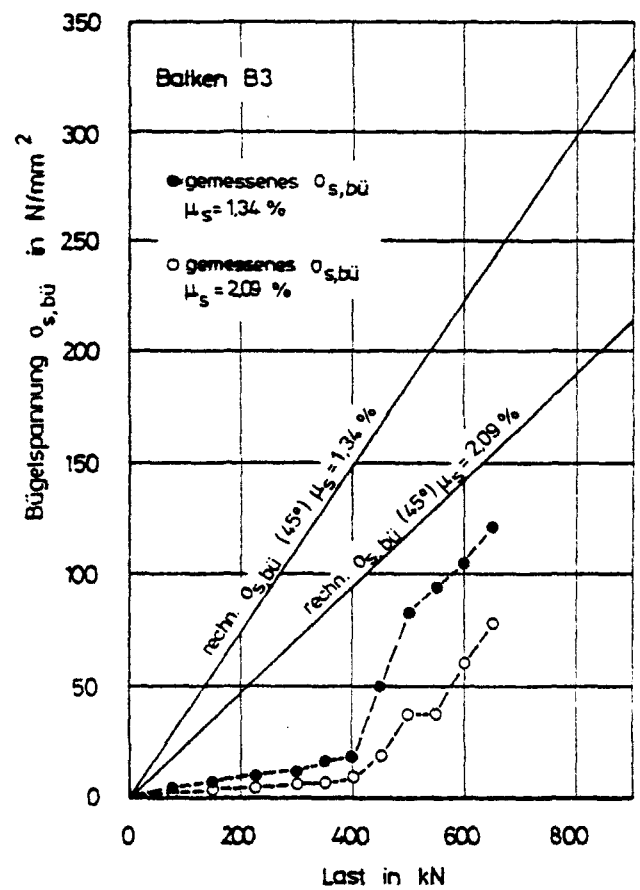
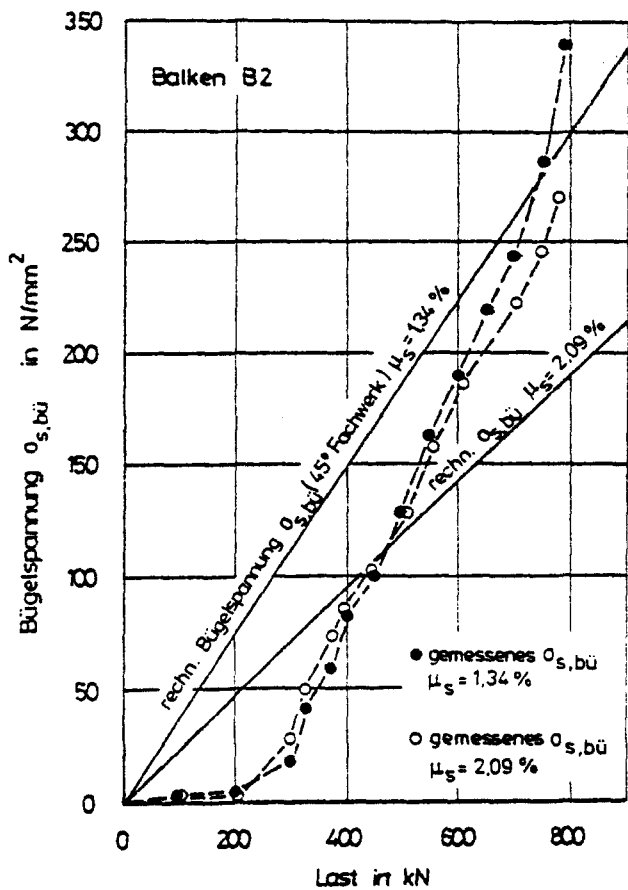
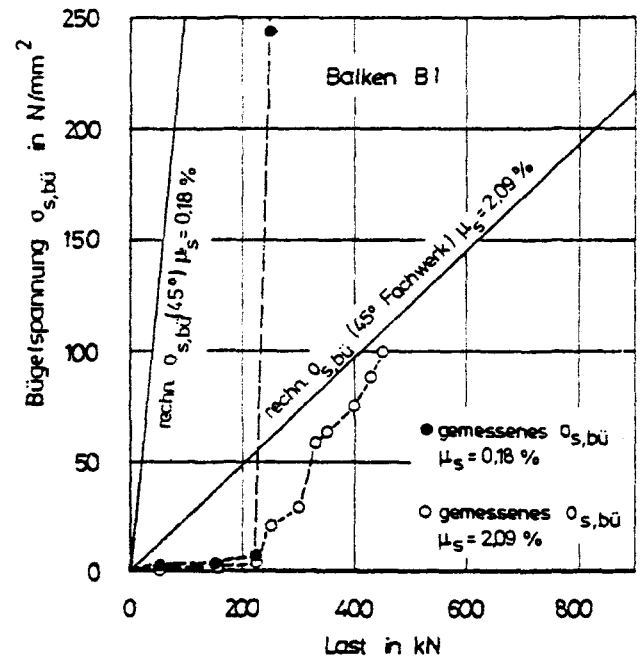
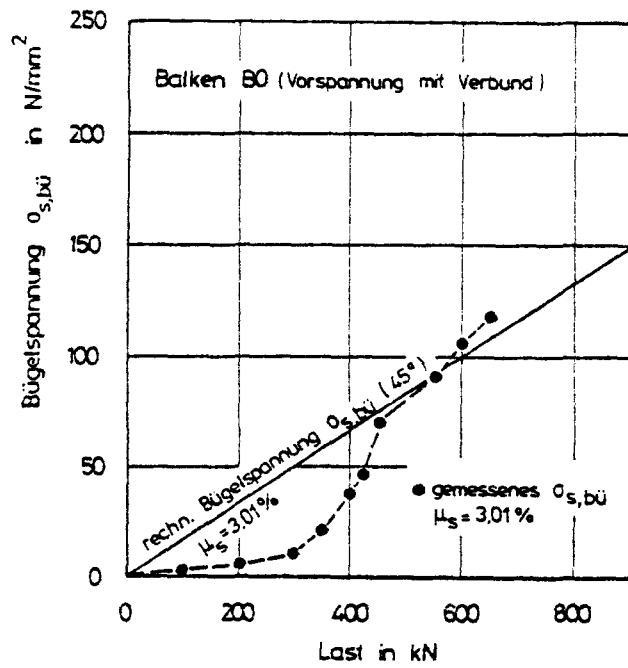


Bild 5.11: Vergleich der rechnerischen und gemessenen Bügelspannungen

Außerdem ist auch der Einfluß der Meßstellen auf die Meßergebnisse zu berücksichtigen. Durch die Umhüllung der DMS und den Anschluß des Meßkabels wird an den Bügelmeßstellen der Betonquerschnitt geschwächt und werden somit teilweise "Sollrißstellen" vorgegeben. Es ist zu vermuten, daß durch diese Meßmethode vorwiegend Bügeldehnungen im näheren Rißbereich gemessen werden. Aus diesem Grund müssen die gemessenen Bügeldehnungen als obere Grenzwerte angesehen werden.

### 5.5 Betonverformungen

Das Messen der Betonverformungen in den Stegbereichen erfolgte über Meßrosetten (vergl. Anlage A 3.7) und weiteren Setzdehnungsmeßstellen, die nach Bildung eines ausgeprägten Schubrißbildes angeordnet wurden. Aus den Dehnungsmessungen unter  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  zur Stabachse wurden unter Zugrundelegung eines konstanten E-Moduls  $E_B$  Richtung und Größe der Hauptdehnung  $\epsilon_I$  und  $\epsilon_{II}$  ermittelt. Die gemessenen Betonverformungen und zugehörigen berechneten Hauptdehnungen sind im Anhang laststufenweise zusammengestellt. Die gemessenen Hauptzugspannungen entsprechen in den unteren Laststufen etwa den Rechenwerten, bei höheren Lasten bleiben sie darunter, da sich hier die Schubbewehrung an der Lastabtragung beteiligt. Die gemessenen Hauptdruckdehnungen im gerissenen Zustand liegen durchweg über den rechnerischen Werten. Dies ist auf die aufgetretene Rißbildung zurückzuführen, wodurch die Hauptdruckrichtung höher beansprucht wird. Auch die Querkzugbeanspruchung der Druckstreben durch die Bügel wirkt sich aus.

Nach Ausbildung der Schubrisse wurden die Dehnungen der Druckstreben durch zusätzliche Meßstellen parallel zur Rißrichtung bzw. unter  $45^\circ$  zur Längsachse gemessen. Auch die Meßwerte der Rosetten in ungerissenen Bereichen wurden zur Beurteilung des Betonverformungsverhaltens herangezogen. Aus den Ergebnissen der unter  $45^\circ$  zur Längsachse geneigten Meßstellen kann auch dann auf die Beanspruchung der Betondruckstreben geschlossen werden, wenn die benachbarten Risse nicht mehr unter  $45^\circ$  geneigt sind. Nach /22/ kann der Einfluß einer Richtungsabweichung abgeschätzt werden. Danach beträgt die Dehnungs-



komponente  $\varepsilon_{\varphi}$ , die unter dem Winkel  $\varphi$  gegen die Hauptdehnung geneigt ist

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{1}{2} \varepsilon_1 (1-\mu) + (1+\mu) \cos 2\varphi \quad (5.11)$$

Setzt man  $\varepsilon_{\varphi} = \varepsilon_{45^\circ}$  (Rosettendehnung unter  $45^\circ$ ) und  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{II}$  (Hauptdehnung der Druckstrebe), so erhält man

$$\varepsilon_{II} = \frac{2}{(1-\mu) + (1+\mu) \cdot \cos 2\varphi} \cdot \varepsilon_{45^\circ} \quad (5.12)$$

Die Auswertung der Funktion ergibt, daß bis zu Winkelabweichungen von  $\varphi = 10^\circ$  die Dehnungsunterschiede unter 4% bleiben. Dies bedeutet, daß hier die Dehnungen  $\varepsilon_{45^\circ}$  den Werten  $\varepsilon_{II}$  annähernd gleichgesetzt werden können.

Um aus den gemessenen Betondruckstrebenstauchungen die zugehörigen Fachwerkdruckstrebenkräfte zu erhalten, muß beachtet werden, daß das in Kurzzeitversuchen an einachsrig gedrückten Prismen gewonnene  $\sigma_b$ - $\varepsilon_b$ -Diagramm hier nicht anwendbar ist. Nach erfolgter Schubrißbildung wird die Spannungs-Dehnungsbeziehung des Betons in den schubbeanspruchten Bereichen durch die von den Bügeln bewirkte Querkzugbeanspruchung der Betondruckstreben beeinflusst (vergl. /19,21,23/). Der Einfluß der Querkzugbeanspruchung auf das  $\sigma_b$ - $\varepsilon_b$ -Diagramm wird hier näherungsweise nach Collins/Mitchell /23/ behandelt und im folgenden mit dem Abminderungsfaktor  $\alpha_Q$  erfaßt. Nach Collins/Mitchell beträgt das Verhältnis der Druckstrebenfestigkeit zur Prismenfestigkeit  $\alpha_Q = \beta_D / \beta_P$  zwischen 0,60 und 0,80. Vereinfachend wird hier für alle Balken der Abminderungsfaktor  $\alpha_Q$  zu 0,70 angesetzt. Der Festigkeitsabfall der Druckstreben steigt mit zunehmender Bügelbeanspruchung und mit abnehmender Druckstrebenneigung.

Die im Bruchlastbereich gemessenen mittleren Betondruckstrebenstauchungen lagen zwischen - 0,41 o/oo (Versuchsbalken B0) und - 1,68 o/oo (Versuchsbalken B2). Die an den einzelnen Versuchsbalken gemessenen größten Betondruckstrebenstauchungen betrugen zwischen - 0,70 o/oo (B0) und - 3,07 o/oo (B2).

## 6. Analyse des Tragverhaltens

### 6.1 Vergleich mit geltenden Bemessungsvorschriften

Die experimentell ermittelten Bruchlasten aller Versuchskörper sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt. Es traten - wie bereits erwähnt - drei verschiedene Brucharten auf:

- Betondruckstrebenbruch (Versuchsbalken B0 und B2)
- Druckstrebenbruch mit Überschreiten der Betondruckfestigkeit in der vorgedrückten Zugzone im Auflagerbereich (Versuchsbalken B3 mit T-Querschnitt)
- Schubzugbruch durch Versagen der Bügelbewehrung (Versuchsbalken B1)

Den Bruchlasten sind in Tabelle 5.2 die rechnerisch ermittelten Traglasten gegenübergestellt, die sich nach DIN 4227/6 bzw. DIN 4227/1 sowie der CEB/FIP-Mustervorschrift ergeben.

#### 6.1.1 DIN 4227 Teil 6 bzw. Teil 1

Nach DIN 4227 Teil 6 kann der Nachweis der Schubtragfähigkeit mit zwei grundsätzlich verschiedenen Bemessungsmodellen, nämlich dem Fachwerk- und dem Bogen-Zugbrandmodell, geführt werden.

Bei Anwendung des Fachwerkmodells erfolgt der Schubnachweis im rechnerischen Bruchzustand entsprechend DIN 4227 Teil 1.

Nach DIN 4227 Teil 1 sind längs des Tragwerks zwei das Schubtragverhalten kennzeichnende Zonen zu unterscheiden:

Die Zone a, in der Biegerisse nicht zu erwarten sind, und die Zone b, in der sich Schubrisse aus Biegerissen entwickeln. Da bei den Versuchsbalken sowohl die Zone a als auch b auftrat, werden nachfolgend die Traglasten für beide Bereiche ermittelt.

Allgemein kann man nach der DIN 4227 Teil 1 bezüglich des Schubtragverhaltens zwei Versagensarten unterscheiden:

Bruchart 1: Versagen des Betons im Steg

Bruchart 2: Versagen der Bügelbewehrung

#### Zu Bruchart 1

Zur Verhinderung eines Betondruckstrebenbruchs wird in Zone a die Hauptdruckspannung  $\sigma_2^{II}$  und in Zone b der Rechenwert der Schubspannungen  $\tau_R$  begrenzt .

Die schiefen Hauptdruckspannungen  $\sigma_2^{II}$  sind nach der Fachwerk-analogie zu ermitteln, wobei angenommen wird, daß der Beton gerissen ist und dabei keine Hauptzugspannungen mehr übertragen kann. Die Neigung der Druckstreben ist nach Gleichung 6.1 anzunehmen:

$$\tan \vartheta = \tan \vartheta_1 \left(1 - \frac{\Delta \tau}{\tau_u}\right) \quad (6.1)$$

$$\tan \vartheta \geq 0,4$$

Hierin bedeuten:

$\tan \vartheta_1$       Neigung der Hauptdruckspannungen gegen die Querschnittsnormale nach Zustand I in der Schwerlinie des Trägers

$\tau_u$  der Größtwert der Schubspannung im rechnerischen Bruchzustand nach Zustand I ermittelt

$\Delta\tau$  60 % der Werte nach Tabelle 9 Zeile 50  
DIN 4227 Teil 1

Die schiefen Hauptdruckspannungen dürfen die Werte zul  $\sigma_2^{II}$  der Tabelle 9 Zeile 62 bzw. 63 (DIN 4227/1) nicht überschreiten. Danach ergibt sich für die Zone a folgende Schubtraglast

$$Q_{u1} = b_o \cdot z \cdot \sin^2 \vartheta (\cot \vartheta + \cot \beta) \cdot \text{zul } \sigma_2^{II} \quad (6.2)$$

Hierbei wird mit  $\beta$  der Neigungswinkel der Schubbewehrung und mit  $z$  der Hebelarm der inneren Kräfte bezeichnet.

In Zone b darf die maßgebende Schubspannung infolge Querkraft nach Zustand II die in Tabelle 9 Zeile 56-61 (DIN 4227/1) angegebenen Grenzwerte zul  $\tau_R$  nicht überschreiten. Die Schubtraglast der Zone b beträgt demnach

$$Q_{u1} = \text{zul } \tau_R \cdot b_o \cdot z \quad (6.3)$$

#### Zu Bruchart 2

Die erforderliche Bügelbewehrung ist für die in den Zugstreben eines gedachten Fachwerkes wirkenden Kräfte zu bemessen (Fachwerkanalogie). Dabei ist in Zone a die Neigung der Druckstreben nach Gleichung (6.1) und in Zone b nach Gleichung (6.4) zugrunde zu legen:

$$\tan \vartheta = 1 - \frac{\Delta\tau}{\tau_R} \quad (6.4)$$

$$\tan \vartheta \geq 0,4$$

Versuchsbalken	B0	B1	B2	B3
Experimentelle Schubbruchlast in kN	675	450	800	675
Zugehörige mittlere gemessene Druckstrebenstauchung <sup>4)</sup> :				
a) schwächer verbügelte Balkenhälfte	<sup>5)</sup> -0,41‰	-0,98‰	-1,67‰	-1,63‰
b) stärker verbügelte Balkenhälfte		-0,58‰	-1,50‰	-1,48‰
Zugehörige mittlere gemessene Bügeldehnung <sup>4)</sup> :				
a) schwach verbügelt	<sup>5)</sup> 0,58‰	>500‰	1,68‰	0,60‰
b) stark verbügelt		0,44‰	1,35‰	0,34‰
mittlere Neigung der Schubrisse :				
a) schwach verbügelt	<sup>5)</sup> 35°	29°	35°	30°
b) stark verbügelt		36°	36°	33°
Rechnerische Schubtraglast in kN mit zugeh. rechnerischen Neigung der Druckstreben				
DIN 4227, Teil 1, Zone b	<sup>1)</sup> 520 40°	<sup>2)</sup> 168 30°	<sup>1)</sup> 632 40°	<sup>1)</sup> 722 40°
DIN 4227, Teil 1, Zone a	<sup>1)</sup> 416 28°	<sup>2)</sup> 184 28°	<sup>1)</sup> 544 29°	<sup>1)</sup> 518 22°
CEB / FIP	<sup>1)</sup> 515 45°	<sup>2)</sup> 185 31°	<sup>1)</sup> 690 45°	<sup>2)</sup> 764 42°
Bogen – Zugbandmodell	∅	236	336	396
rechn. Biegebruchlast	<sup>3)</sup> 530	<sup>3)</sup> 472	<sup>3)</sup> 680	<sup>3)</sup> 735

1) Versagen der Betondruckstreben

2) Versagen der Schubbewehrung

3) Biegetragfähigkeit der Druckzone für  $\beta_R = 0,6 \beta_{WN}$

4) aus versuchstechnischen Gründen konnten die Bauteilverformungen unter Bruchlast nicht mehr gemessen werden, deshalb wurden die Meßwerte der letzten gemessenen Laststufe ausgewertet

5) gleiche Verbügelung in beiden Balkenhälften

Tabelle 5.2: Rechnerische Bruchlasten der Balken B0 bis B3

Die Schubtragkraft ergibt sich aus der vorhandenen Schubbewehrung pro Längeneinheit  $a_{s,bü}$  zu:

$$Q_{u2} = a_{s,bü} \cdot \sigma_{s,u} \cdot \sin \beta \cdot z (\cot \vartheta + \cot \beta) \quad (6.5)$$

Für den Sonderfall der ausschließlichen Verwendung von lot-rechter Schubbewehrung vereinfacht sich Gleichung (6.5) zu

$$Q_{u2} = a_{s,bü} \cdot \sigma_{s,u} \cdot z \cdot \cot \vartheta \quad (6.6)$$

Nach DIN 4227 Teil 6 kann die Schubtragfähigkeit auch auf Grundlage eines Bogen-Zugbandmodells (anstelle eines Fachwerkmodells) ermittelt werden. Bei diesem Tragmodell ist die Hauptdruckspannung des Druckbogens bzw. Druckgurtes maßgebend. Eine Schubbewehrung ist statisch nicht erforderlich, sie ist nur insofern von Bedeutung, als durch die Umschnürung des Druckbogens eine höhere Tragfähigkeit erzielt wird. Die Hauptdruckspannung des Druckbogens ist nach DIN 4227 Teil 6 auf  $0,6 \beta_{WN}$  zu begrenzen. Danach beträgt die Schubtragkraft

$$Q_{u1} = 0,6 \cdot \beta_{WN} \cdot \sin \vartheta \cdot b_D \cdot h_D \quad (6.7)$$

Zur Ermittlung der Schubtragkraft der Versuchsbalken wurde eine mittlere Neigung  $\vartheta$  von  $24^\circ$ , eine Dicke  $h_D$  von 10 cm (Stegdicke) und eine mittlere Breite  $b_D$  von 30 cm des Druckbogens zugrundegelegt. Die Form des Druckbogens wurde als quadratische Parabel angenähert. Der angesetzte Winkel  $\vartheta$  von  $24^\circ$  entspricht der Neigung des Druckbogens in der Schwerlinie.

Ein Vergleich der rechnerischen und experimentellen Schubbruchlasten zeigt, daß die rechnerische Schubtragfähigkeit der Balken BO-B2 sowohl nach dem Fachwerkmodell als auch nach dem Bogen-Zugbandmodell unterhalb der im Versuch erreichten Bruchlasten liegt. Lediglich beim Versuchsbalken B3 mit T-Querschnitt ist die rechnerische Schubbruchlast nach dem Fachwerkmodell (DIN 4227/1 Zone b) größer als die maximale Versuchslast. Die geringere

Bruchlast des Balkens B3 ist auf eine gleichzeitige Druckbeanspruchung aus den "Fachwerkstreben" und der am Auflager eingeleiteten Vorspannkkräfte zurückzuführen. Da hier die Bruchursache kein reines Schubversagen war, können die Versuchsergebnisse des Balkens B3 nicht unmittelbar mit denen der übrigen Versuchsbalken verglichen werden.

Beim Vergleich der rechnerischen Schubtraglasten in Zone a und b zeigen sich deutliche Unterschiede, die auf die unterschiedlichen rechnerischen Druckstrebenneigungen zurückzuführen sind. Die angesetzten Druckstrebenneigungen, die nach Gleichung (6.1) bzw. (6.4) bestimmt werden, sind reine Rechenwerte und müssen weder mit der tatsächlichen Rißrichtung noch mit den resultierenden schrägen Druckkräften übereinstimmen. Da in der Zone a - im Unterschied zu Zone b - die Neigung der Hauptdruckspannungen nach Zustand I im Ansatz für die rechnerische Druckstrebenneigung berücksichtigt wird, ergeben sich hier flachere rechnerische Druckstrebenneigungen. Bei flacheren Strebenneigungen erhöhen sich im Fachwerkmodell die Druckstrebenkräfte und verringert sich die Beanspruchung der Bügel. Aus diesem Grund ergeben sich für Balken, bei denen die Druckstrebentragfähigkeit maßgebend ist, in Zone a gegenüber Zone b geringere rechnerische Traglasten, während für Balken, bei denen Bügelversagen maßgebend ist, die rechnerische Traglast in Zone a größer ist als in Zone b.

#### 6.1.2 CEB/FIP-Mustervorschrift

In der CEB/FIP-Mustervorschrift wird die Vorspannung ohne Verbund nicht allgemein behandelt. Im Abschnitt 4.5.1 wird darauf hingewiesen, daß alle Auswirkungen der Vorspannung ohne Verbund als Teil der aufzunehmenden äußeren Schnittgrößen in Rechnung gestellt werden müssen.

Lediglich beim Nachweis der Schubtragfähigkeit von Bauteilen ohne Schubbewehrung dürfen nach Regan /15/ auch solche mit Vorspannung ohne Verbund einbezogen werden.

Da der Nachweis der Schubtragfähigkeit von Bauteilen mit Schubbewehrung in der CEB/FIP-Mustervorschrift ähnlich wie in DIN 4227 Teil 1 auf Grundlage der Fachwerkanalogie geführt wird, werden nachfolgend die Traglasten auch nach dieser für die europäischen Länder richtungsweisenden Vorschrift ermittelt. Nach der CEB/FIP-Mustervorschrift können zwei Verfahren zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit, nämlich die sog. "Standardmethode" und die "verfeinerte Methode" angewendet werden. Nachfolgend wird nach der verfeinerten Methode gerechnet, da sie das wissenschaftlich am weitesten entwickelte Modell darstellt.

#### Zu Bruchart 1

Die Schubtragkraft der Betondruckstreben ergibt sich nach der CEB/FIP-Mustervorschrift zu

$$Q_{u1} = 0,3 \cdot \beta_{PN} \cdot b_0 \cdot h \cdot \sin \vartheta \quad (6.8)$$

Dabei darf der Neigungswinkel der Druckstreben in folgenden Grenzen frei gewählt werden

$$3/5 \leq \cot \vartheta \leq 5/3 \quad (6.9)$$

#### Zu Bruchart 2

Die Schubtragkraft ergibt sich aus der vorhandenen Schubbewehrung und einem der Betondruckzone zugewiesenen Querkraftanteil  $Q_{cd}$  zu

$$Q_{u2} = \frac{A_{b\ddot{u}}}{s} \cdot 0,9 h \cdot \sigma_{s,u} (\cot \vartheta + \cot \beta) \sin \beta + Q_{cd} \quad (6.10)$$

Für Bauteile mit hoher Schubbeanspruchung wird der Anteil  $Q_{cd}$  zu Null.

Die nach Gleichung (6.8) bzw. (6.10) ermittelten Traglasten sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt.



Die rechnerischen Traglasten der Balken B0 - B2 sind nach der CEB/FIP-Mustervorschrift ähnlich wie nach DIN 4227 Teil 1 kleiner als die experimentellen Schubtraglasten. Jedoch konnte für die Balken B1 und B2 gegenüber der DIN 4227 Teil 1 eine höhere rechnerische Traglasten ermittelt werden, da durch die freie Wahl der Druckstrebenneigung eine bessere Ausnutzung sowohl der vorhandenen Bügelbewehrung als auch der Druckstrebentragfähigkeit erzielt wird.

## 6.2 Bewertung des Tragverhaltens der Versuchsbalken

Anhand der in den vorangegangenen Kapitel diskutierten Versuchsergebnissen und den in Tabelle 5.2 vorliegenden Vergleich mit den theoretischen Schubtraglasten, die sich bei Anwendung der Bemessungsvorschriften nach DIN 4227 Teil 1 bzw. Teil 6 sowie dem CEB/FIP-Model-Code ergeben, soll im folgenden eine kurze Analyse des Schubtragverhaltens bei Vorspannung ohne Verbund erfolgen, soweit dies bei insgesamt 4 durchgeführten Balkenversuchen möglich ist. Ausgangspunkt dieser Untersuchung ist die Frage, durch welches Bemessungsmodell - Fachwerk- oder Bogenzug andmodell bzw. Kombination von beiden - das tatsächliche Tragverhalten wirklichkeitsnah erfaßt werden kann.

Die Versuchsergebnisse (Bügeldehnungen und Betonstauchungen des Steges) zeigen, daß das reine Bogen-Zugbandmodell das Schubtragverhaltender Versuchskörper nicht wirklichkeitsnah beschreiben kann. Bei Anwendung des Bogen-Zugbandmodells ergibt sich die Bruchlast allein aus der Tragfähigkeit von Druckbogen und Zugband. Die Bügelbewehrung ist konstruktiv erforderlich und verbindet den Druckbogen mit dem Zuggurt ohne sich an der Querkraftaufnahme-theoretisch-zu beteiligen. Ein derartiges Tragverhalten konnte durch die gemessenen Bügeldehnungen und Betonstauchungen nicht bestätigt werden (vgl. Tabelle 5.2). Die gemessenen Bügeldehnungen betrugen zwischen 0,34 ‰ (Balken B3) und 5,00 ‰ (Balken B1) und lassen eher auf eine Fachwerk-Tragwirkung schließen. Mit den nach dem Bogen-Zugbandmodell berechneten Traglasten, die zwischen 42 % (Balken B2) und 58 % (Balken B3) der im Versuch erreichten max. Schubtraglasten

betragen, wird die tatsächliche Traglast - besonders bei stark profilierten Bauteilen aufgrund der geringen Bogenquerschnittsfläche im Stegbereich - stark unterschätzt.

Für die weitere Betrachtung des Tragverhaltens soll hier zwischen den beiden Schubbereichen Zone a (ungerissener Zuggurt) und Zone b (gerissener Zuggurt) unterschieden werden. Für Zone a mit ungerissenenem Zuggurt erfolgt die Querkraftaufnahme uneingeschränkt nach dem Fachwerkmodell, da der infolge Vorspannung überdrückte Zuggurt die zusätzlichen Längszugkräfte (Versatzkräfte) aus der Fachwerkwirkung aufnehmen kann.

Einen starken Einfluß auf das Schubtragverhalten übt der Bügelbewehrungsgrad aus, wie ein Vergleich der experimentellen und rechnerischen Traglasten zeigt. Bei starker Verbügelung (Versuchsbalken B2) beträgt die rechnerische Traglast nach CEB/FIP 86 % der im Versuch erreichten Schubbruchlast. Die Gegenüberstellung mit dem Vergleichsbalken B0, dessen rechnerische Bruchlast 78 % der max. Versuchslast beträgt, zeigt, daß zumindest bei stark schubbewehrten Balken die Schubtragfähigkeit nur wenig von der Verbundart der Spannglieder beeinflusst wird. Bei den stark schubbewehrten Balken mit Vorspannung ohne Verbund deuten die gemessenen Bügeldehnungen und Betonstauchungen sowie die an der Längsbewehrung festgestellten Versatzkräfte auch im Vergleich mit Balken B0 (Vorspannung mit Verbund) auf eine Querkraftaufnahme nach dem Fachwerkmodell hin. Die Versatzkräfte aus der Fachwerkwirkung werden entweder von der ungerissenen Zugzone oder durch Betonstahl-Längsbewehrung aufgenommen. Sind in der Zugzone sehr geringe Betonstahlbewehrungsmengen angeordnet, so bilden sich im Bereich der maximalen Momentenbeanspruchung in der Regel nur Risse in einem engbegrenzten Bereich aus, so daß sich die von der Lasteinleitung ausgehenden Betondruckstreben auf Bereiche mit ungerissenenem Zuggurt abstützen können. Erst mit zunehmenden Betonstahlbewehrungsgehalt vergrößert sich die Länge der gerissenen Zugzone. Hier können jedoch die Versatzkräfte durch Betonstahlbewehrung aufgenommen

werden. Bei starker Verbügelung dürfte die Traglastminderung gegenüber Vorspannung mit Verbund, die auf die geringere Steifigkeit des Zuggurtes bei Vorspannung ohne Verbund zurückzuführen ist, etwa 10% betragen. Um für Vorspannung mit und ohne Verbund gleiches Sicherheitsniveau zu garantieren, erscheint es notwendig, für Balken mit starker Bügelbewehrung die nach DIN 4227 Teil 1 auf der Grundlage des Fachwerkmodells berechneten Schubtraglasten bei Vorspannung ohne Verbund zu reduzieren.

Im Vergleich zu den stark schubbewehrten Balken ist beim Versuchsbalken BO mit geringer Schubbewehrung ein deutlich größerer Unterschied zwischen rechnerischen und experimentellen Bruchlasten festzustellen. Die rechnerische Schubtraglast nach CEB/FIP betrug nur 41 % der im Versuch erreichten Schubtraglast. Ein direkter Vergleich mit einem schwachschubbewehrtem Balken, dessen Spannglieder im Verbund liegen, kann hier nicht erfolgen. Jedoch können zur Deutung des Tragverhaltens derart bewehrter Bauteile Versuche von Leonhardt und Walther /24/ herangezogen werden, die den Einfluß der Verbundgüte der Längsbewehrung auf das Schubtragverhalten an Balken ohne Schubbewehrung untersuchten. Bei diesen Untersuchungen erreichten die Versuchsbalken, deren Längsbewehrung den schlechtesten Verbund besaßen, bei sonst gleicher Ausführung die höchsten Schubtraglasten. Diese höhere Schubtragsfähigkeit wird darauf zurückgeführt, daß große Bereiche des Balkens mit verbundloser Längsbewehrung, bedingt durch die Verankerung der Längskräfte am Balkenende, ungerissen bleiben und die Querkkräfte über diese Balkenbereiche abgeleitet werden. Ein ähnliches Tragverhalten kann bei dem hier untersuchten schwachschubbewehrten Balken B1 unterstellt werden, zumal da durch die Einleitung der gesamten Spanngliedkraft am Balkenende auch Balkenbereiche mit geringer Momenten- und hoher Querkraftbeanspruchung stärker überdrückt werden. Wie groß der Anteil der Querkraft ist, der bei schwach schubbewehrten Balken und bei geringen Mengen im Verbund liegender Längsbewehrung über den ungerissenen Druckgurt ins

Auflager abgetragen wird und nach welchem Modell die Ermittlung der Schubtragkraft erfolgen kann, ist durch weitere experimentelle Untersuchungen zu klären.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens sollte die Schubtragfähigkeit von balkenartigen Bauteilen mit Vorspannung ohne Verbund untersucht werden. Hierzu wurden insgesamt 4 Versuchsbalken mit I- bzw. T-Querschnitt als Einfeld-Träger mit einer Einzellast in Feldmitte untersucht. Bei allen Versuchsbalken wurde der Schubbewehrungsgrad und die Betonstahl-Längsbewehrung in der Zugzone variiert. Während der Versuche wurden bei jeder Laststufe die Durchbiegungen der Balken, die Bügel- und Spannstahldehnungen, die Betonverformungen im Stegbereich sowie die Rißbreiten gemessen.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse sowie der Vergleich der im Versuch ermittelten Bruchlasten mit den geltenden Bemessungsvorschriften lassen folgende Schlußfolgerungen zu:

1. Die rechnerischen Hauptzugspannungen beim Auftreten der ersten Schubrisse waren im Mittel 15 % größer als die nach DIN 4227 Teil 1 für beschränkte Vorspannung im Gebrauchszustand zulässigen Hauptzugspannungen.
2. Für Balken mit geringerem Schubbewehrungsgehalt wurde eine hohe Schubtragfähigkeit festgestellt. Die im Versuch erreichte Schubtraglast betrug rd. das 2,5-fache der rechnerischen Schubtraglast nach DIN 4227 Teil 1 bzw. CEB/FIP. Es ist anzunehmen, daß für geringe Schubbewehrungsgehalte und gleichzeitig geringen Mengen im Verbund liegender Längsbewehrung nennenswerte Querkraftanteile über den ungerissenen Druckgurt abgetragen werden. Ein theoretisches Tragmodell kann erst nach weiteren experimentellen Untersuchungen vor allem auch an Durchlaufträgern entwickelt werden.

3. Bei hohen Schubbewehrungsgraden kann die Querkraftaufnahme ähnlich wie bei Vorspannung mit Verbund durch die Fachwerkanalogie zutreffend erfaßt werden, jedoch wurden im Vergleich zur Vorspannung mit Verbund rd. 10% geringere Bruchlasten erreicht. Zur weiteren Verallgemeinerung dieser Aussage waren nachfolgende Einflußparameter zu untersuchen: Spanngliedlage und Spanngliedführung, statisches System und Querschnittsausbildung.

Anhand der drei durchgeführten Balkenversuche zum Schubtragverhalten bei Vorspannung ohne Verbund konnten nur erste, grundsätzliche Fragen geklärt werden. Für eine umfassende Beurteilung des Schubtragverhaltens und zur Aufstellung von detaillierten Bemessungsvorschlägen für balkenartige Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund sind weitere experimentelle Untersuchungen erforderlich. Diese sollten folgenden Parametern nachgehen : Momentenverteilung, Verhältnis Stützweite zu Bauteilhöhe, Kragträger und Durchlaufträger mit entsprechender Spanngliedführung, gekrümmt geführte Spannglieder bei statisch bestimmt gelagerten Trägern.

8 Literaturverzeichnis

- /1/ GALLAWAY, T.M.  
DESIGN FEATURES AND PRESTRESSING ASPECTS OF LONG KEY BRIDGE  
PCI-JOURNAL, NOVEMBER-DEZEMBER 1980, S.84-96
- /2/ MULLER, J.  
CONSTRUCTION OF LONG KEY BRIDGE  
PCI-JOURNAL, NOVEMBER-DEZEMBER 1980, S.97-110
- /3/ JUNGWIRTH, D.  
UEBERLEGUNGEN ZUM SCHUBTRAGVERHALTEN BEI VORSPANNUNG OHNE  
VERBUND  
ARBEITSPAPIER DES U.A. DIN 4227/TEIL 6
- /4/ WOELFEL, E.  
VORSPANNUNG OHNE VERBUND - BESONDERHEITEN DER BEMESSUNG  
BETON- UND STAHLBETONBAU 9/81
- /5/ PAUSER, A.  
SPANNBETON - RUECKBLICK UND VORSCHAU  
ZEMENT UND BETON, HEFT 3, 1982
- /6/ GIEHRACH, U; SAETTLE, CH.  
DIE VERSUCHE DER BUNDESBAHN AN SPANNBETON-  
BALKEN IN KORNWESTHEIM  
HEFT 115 DES DAFSTB, VERLAG WILHELM ERNST SOHN, 1954

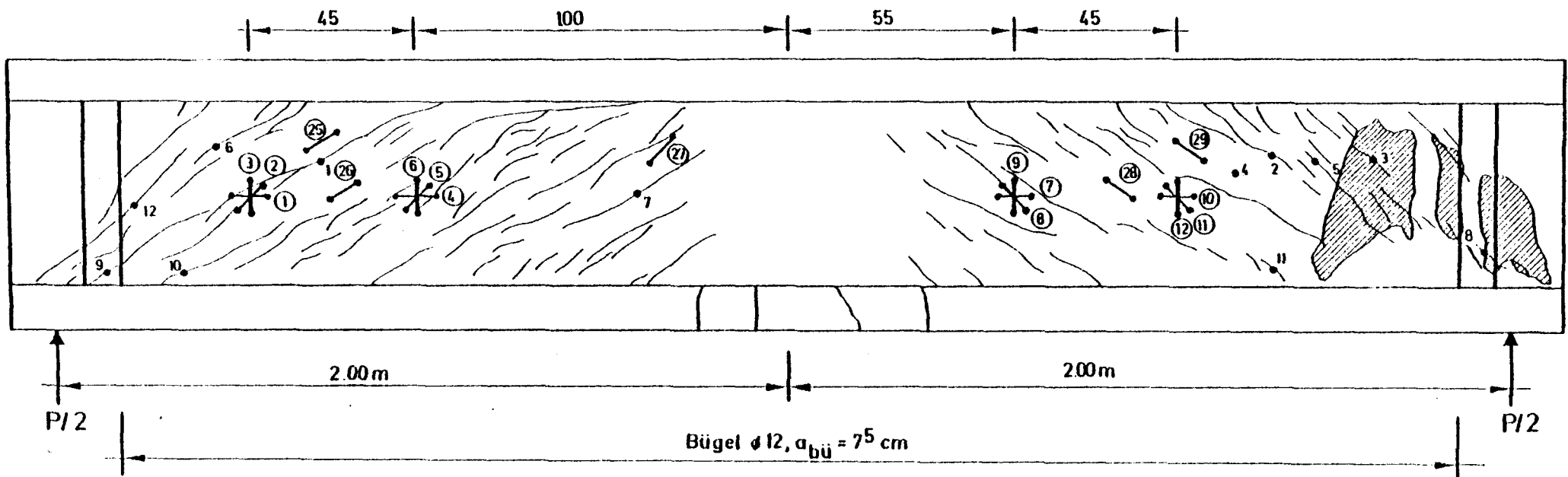
- /7/ GIFFORD, F.W.  
TESTS ON END-ANCHORED UNBONDED PRESTRESSED CONCRETE BEAMS  
HAVING PARABOLIC STEEL ECCENTRICITY, SUBJECT TO UNIFORMLY  
DISTRIBUTED LOADING  
MAGAZIN OF CONCRETE RESEARCH, S.27-36, AUGUST 1953
- /8/ MATTOCK, A.H.  
A STUDY OF THE ULTIMATE MOMENT OF RESISTANCE OF PRESTRESSED  
AND REINFORCED CONCRETE BEAMS, WITH PARTICULAR REFERENCE TO  
BOND CONDITIONS. DISSERTATION.  
UNIVERSITY OF LONDON, 1955.
- /9/ RUESCH, H. ; KORDINA, K. ; ZELGER, C.  
BRUCHSICHERHEIT BEI VORSPANNUNG OHNE VERBUND  
HEFT 130 DES DEUTSCHEN AUSSCHUSSES FUER STAHLBETON  
IN BERLIN, 1959
- /10/ WARWARUK, J. ; SOZEN, M ; SIESS, C.P.  
STRENGTH AND BEHAVIOUR IN FLEXURE OF PRESTRESSED CONCRETE  
BEAMS  
UNIVERSITY OF ILLINOIS,  
ENGINEERING EXPERIMENT STATION BULLETIN NO.464, 1962.
- /11/ TROST, H.  
VORSPANNUNG OHNE VERBUND - VERSUCHE UND DEREN ERGEBNISSE  
BETON UND STAHLBETONBAU 76, HEFT 9, S.205-209, 1981
- /12/ GEYMAYER, H. ; ROCK, S.  
TRAGVERHALTEN VON VORGESpanNTEN KRAGTRAEGERN OHNE VERBUND.  
TEIL 1: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG  
FORSCHUNGSBERICHT DER TECHNISCHEN VERSUCHS-UND FORSCHUNGS-  
ANSTALT FUER FESTIGKEITS-UND MATERIALPRUEFUNG  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITAET GRAZ, DEZEMBER 1982

- /13/ LORENTSEN, M.  
SHEAR AND BOND IN PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITHOUT  
SHEAR REINFORCEMENT  
TRANSACTION NO. 47, NATIONAL SWEDISH COUNCIL FOR BUILDING  
RESEARCH, STOCKHOLM, 1964.
- /14/ JENA, B. ; PANNELL, F.N.  
THE DIAGONAL CRACKING STRENGTH OF CONTINUOUS PRESTRESSED  
CONCRETE BEAMS  
MAGAZIN OF CONCRETE RESEARCH, VOL.24, NO.78, MAI 1972.
- /15/ REGAN, P.  
CEB COMMISSION V - REPORT OF WORKING GROUP ON  
SHEAR IN SLABS AND BEAMS WITH UNBONDED TENDONS  
CEB COMMISSION V, NEAPEL, OKTOBER 1975.
- /16/ CEB/FIP - MUSTERVORSCHRIFT  
MUSTERVORSCHRIFT FUER TRAGWERKE AUS STAHLBETON UND  
SPANNBETON, AUSGABE 1978.
- /17/ DIN 4227, TEIL 6: SPANNBETON, BAUTEILE MIT VORSPANNUNG  
OHNE VERBUND  
AUSGABE MAI 1982.
- /18/ DIN 4227 TEIL 1 : SPANNBETON, BAUTEILE AUS NORMALBETON MIT  
BESCHRAENKTER ODER VOLLER VORSPANNUNG , AUSGABE DEZ. 1979

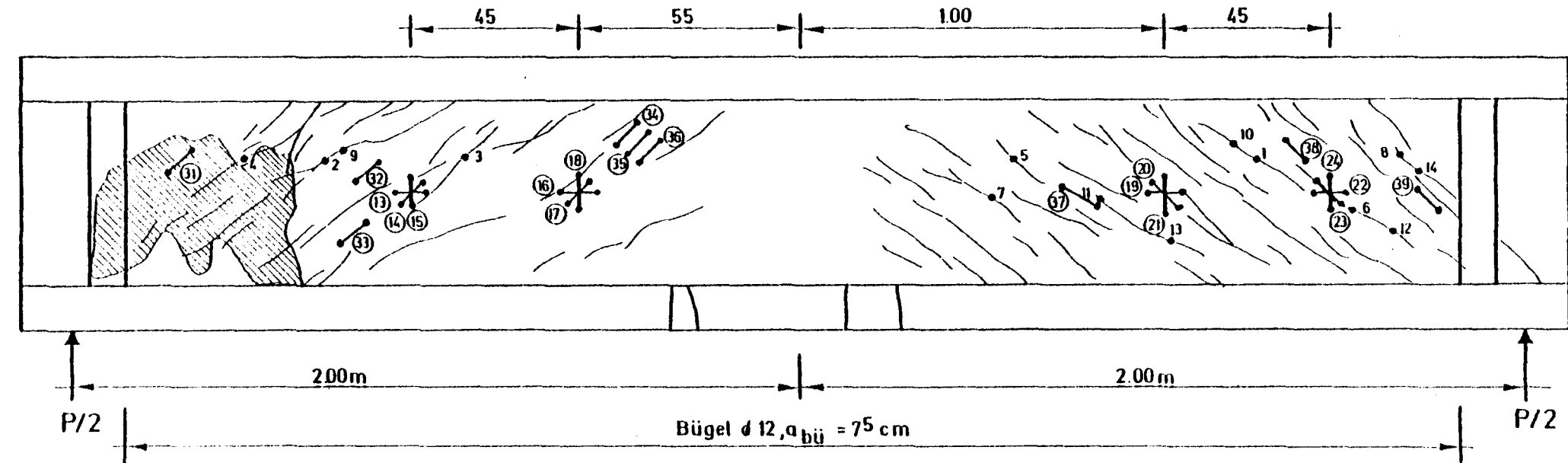


- /19/ VECCHIO,F.; ; COLLINS,M.P.  
STRESS-STRAIN CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE  
IN PURE SHEAR.  
IABSE - KOLLOQUIUM, S.233-247, DELFT, JUNI 1981.
- /20/ LEONHARDT,F.  
VORLESUNGEN UEBER MASSIVBAU, TEIL 4  
SPRINGER VERLAG BERLIN, 1976.
- /21/ KOCH,F.L. ; LEONHARDT,F.; ROSTASY, F.S.  
SCHUBVERSUCHE AN SPANNBETONTRAEGERN  
DEUTSCHER AUSSCHUSS FUER STAHLBETON, 1973, HEFT 227
- /22/ ROETSCHER,F.; ; JASCHKE,R.  
AUSWERTUNG VON DRUCKMESSUNGEN  
SPRINGER VERLAG BERLIN 1939
- /23/ COLLINS,M.P.; MITCHELL,D.  
SHEAR AND TORSION DESIGN OF PRESTRESSED AND NON-PRESTRESSED  
CONCRETE BEAMS  
PCI-JOURNAL, V25. NR5, SEPTEMBER-OKTOBER 1980  
S.32-100
- /24/ LEONHARDT,F.; WALTHER,R.  
SCHUBVERSUCHE AN EINFELDRIGEN STAHLBETONBALKEN MIT UND OHNE  
SCHUBBEWERUNG  
HEFT 151 DES DAFSTB, VERLAG WILHELM ERNST SOHN, 1962

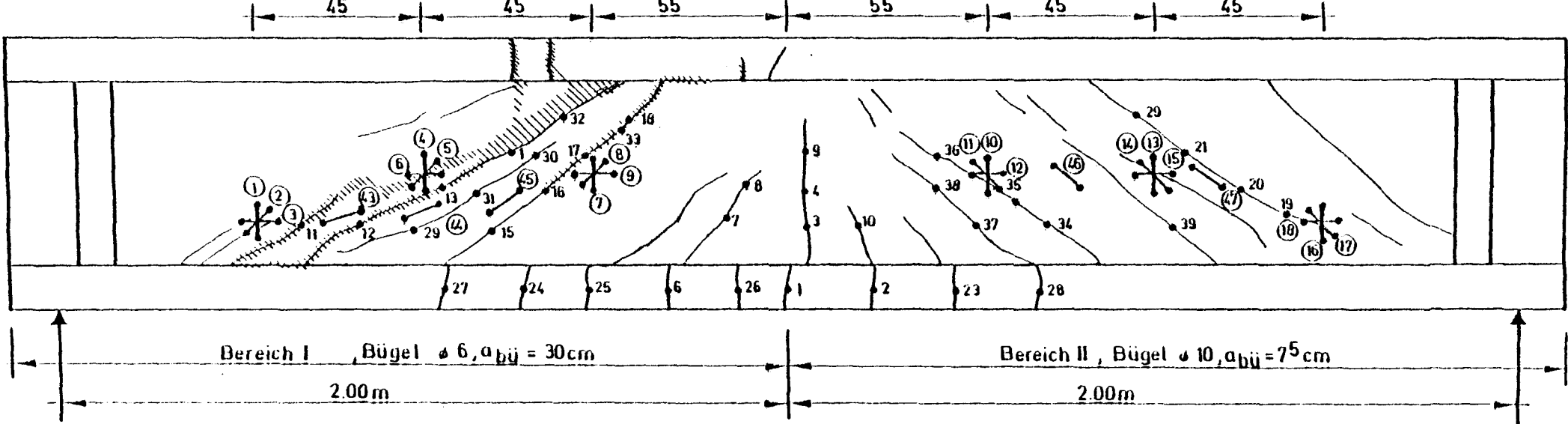
Darstellung des Rissbildes des Versuchsbalkens B0 vorne



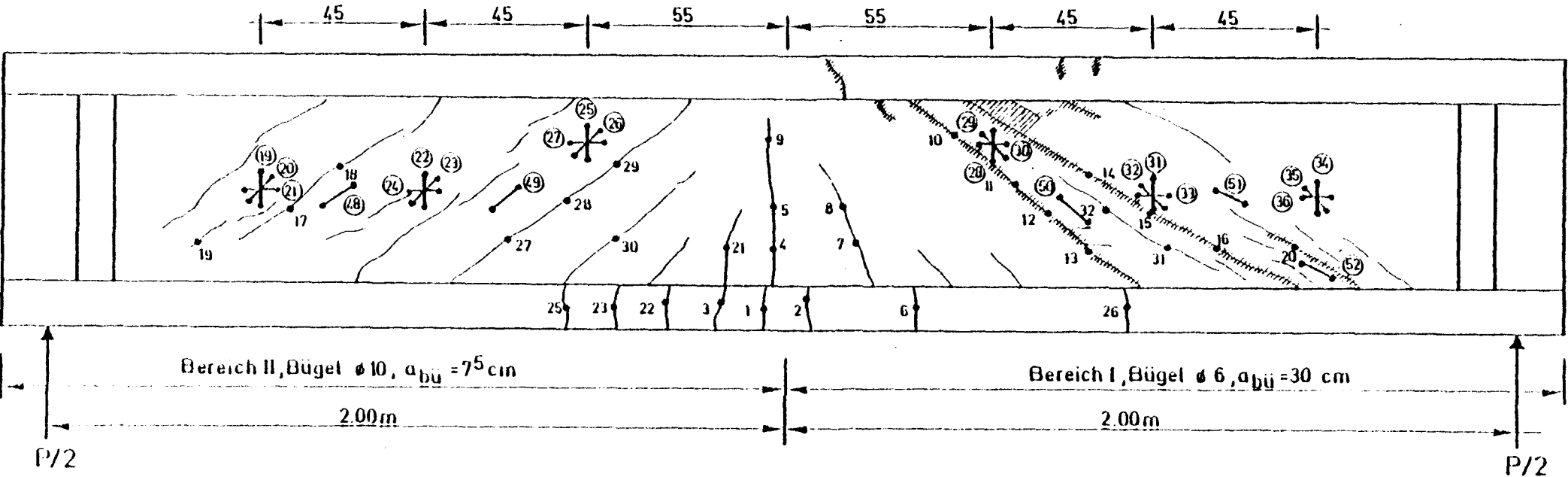
Darstellung des Rissbildes des Versuchsbalkens B0 hinten



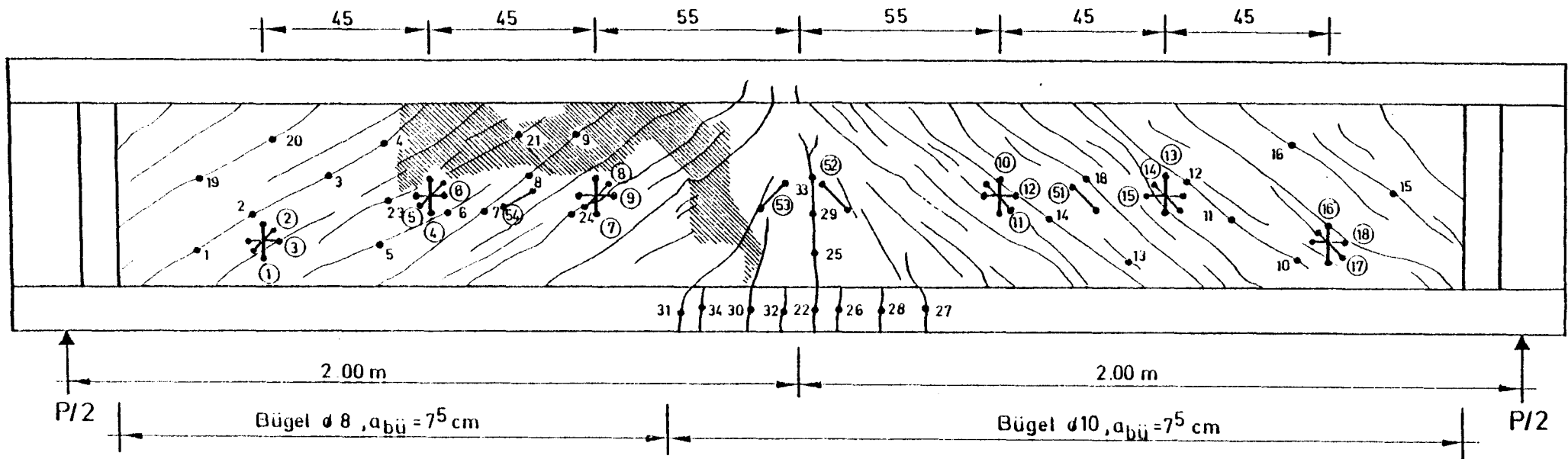
Darstellung des Rissbildes des Versuchsbalkens B1 vorn



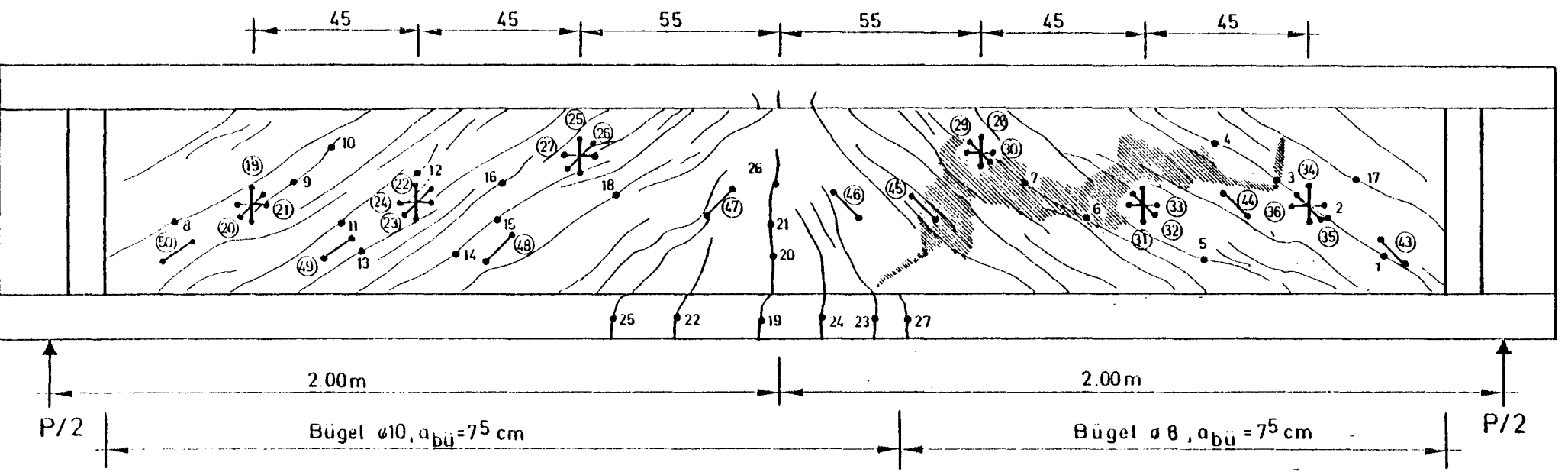
Darstellung des Rissbildes des Versuchsbalkens B1 hinten



Darstellung des Rissbildes des Versuchsbalkens B2 vorn

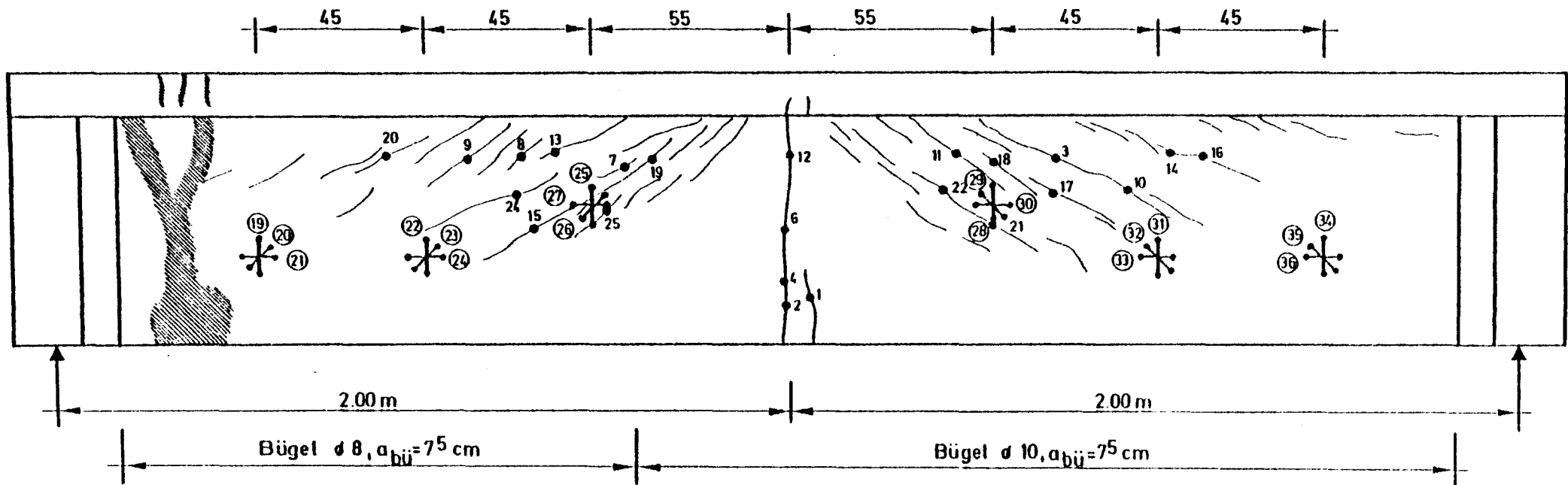


Darstellung des Rissbildes des Versuchsbalkens B2 hinten

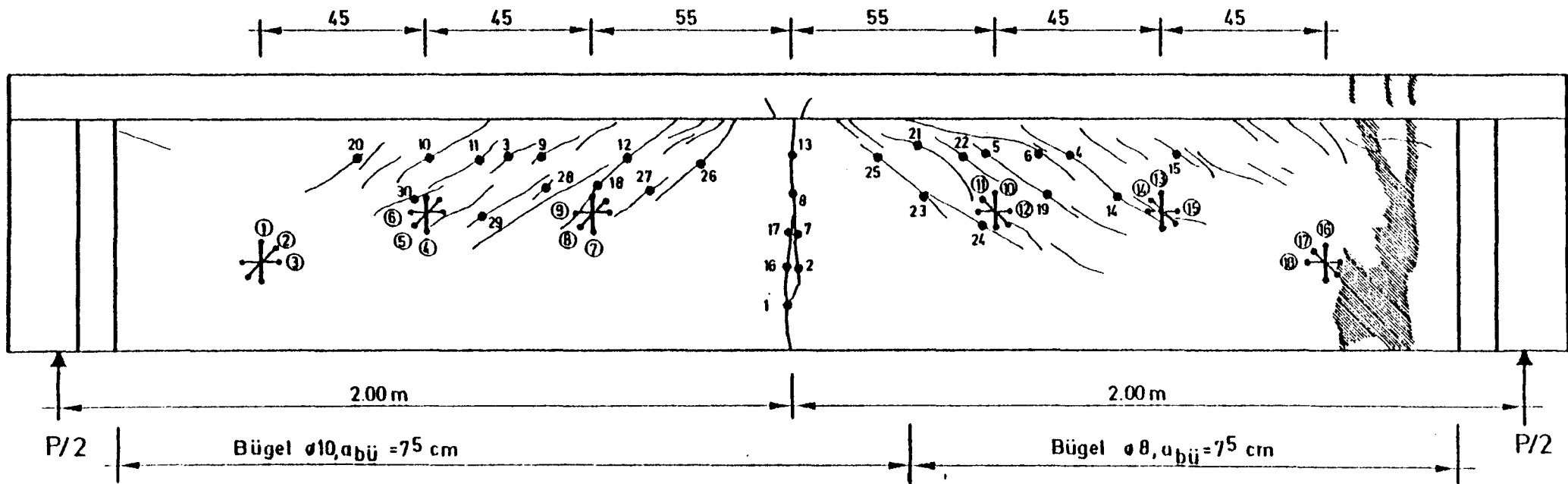


Anlage A 2.3

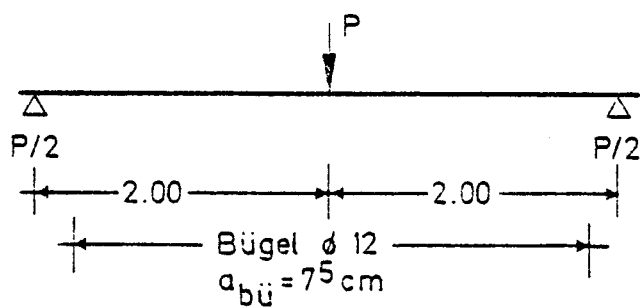
Darstellung des Rissbildes des Versuchsbalkens B3 vorn



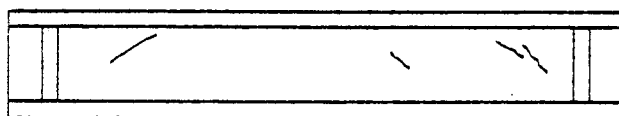
Darstellung des Rissbildes des Versuchsbalkens B3 hinten



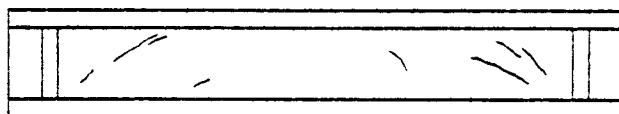
# Rissentwicklung des Versuchsbalkens B0



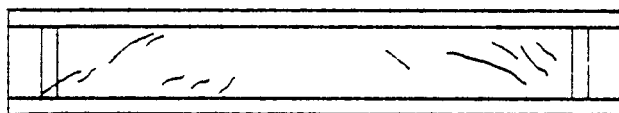
$P/P_U$



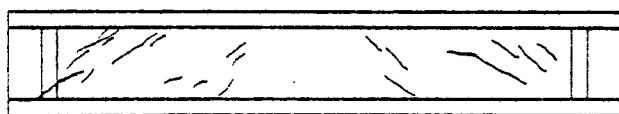
0,519



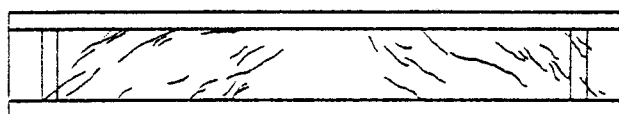
0,556



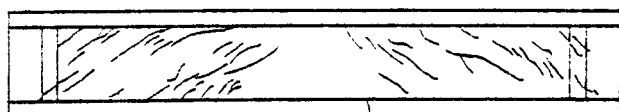
0,593



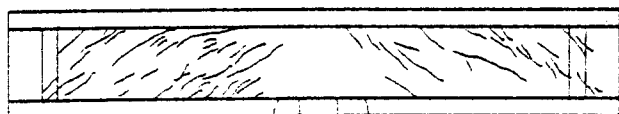
0,630



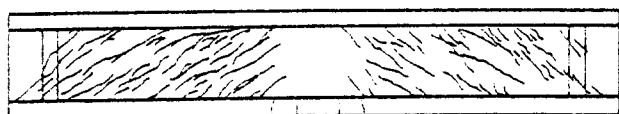
0,667



0,815

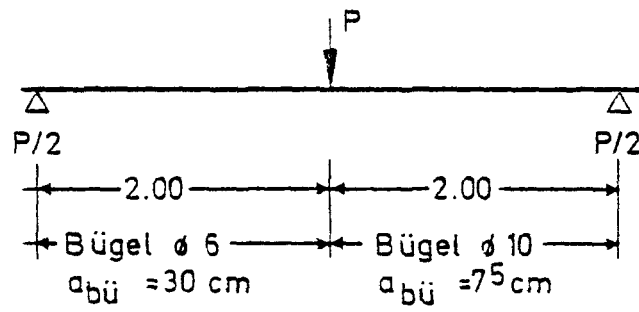


0,889

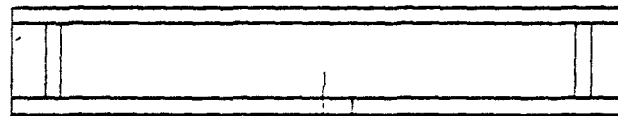


1,000

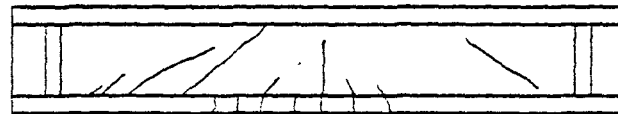
# Rissentwicklung des Versuchsbalkens B1



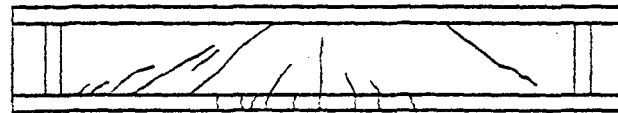
$P/P_u$



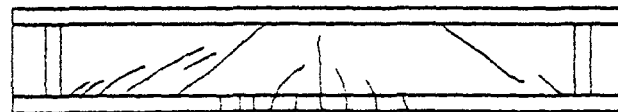
0,500



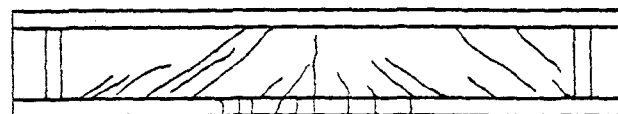
0,556



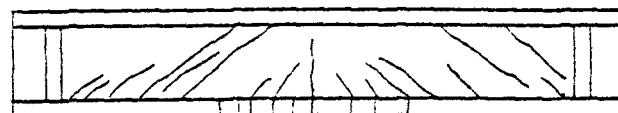
0,556



0,667



0,722



0,778

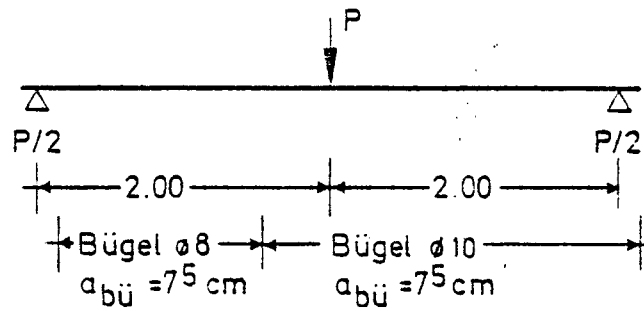


0,883

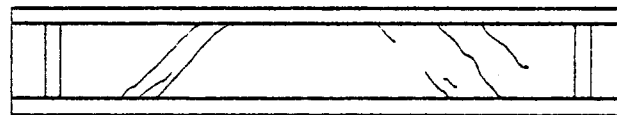


0,944

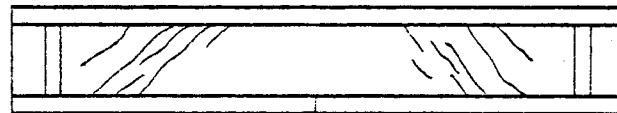
# Rissentwicklung des Versuchsbalkens B2



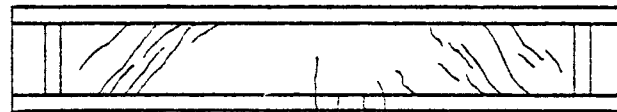
$P/P_u$



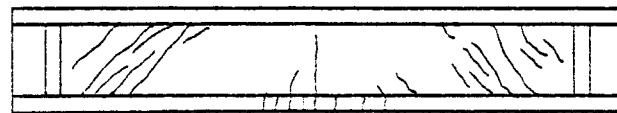
0,438



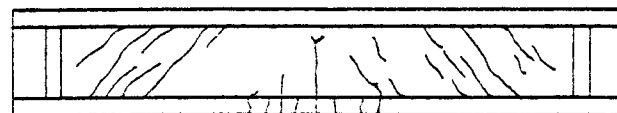
0,500



0,563



0,625



0,688



0,750



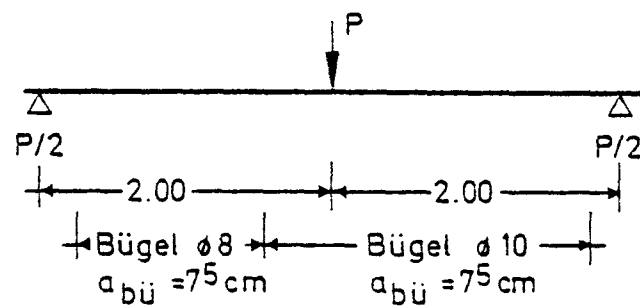
0,813



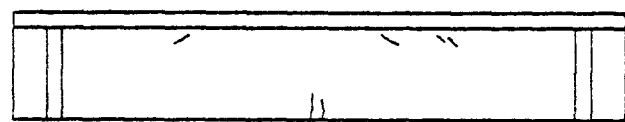
0,938



Rissentwicklung des Versuchsbalkens B 3



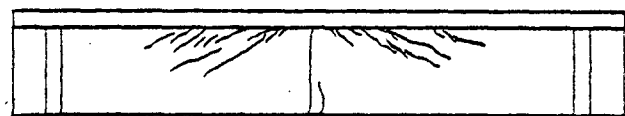
$P/P_u$



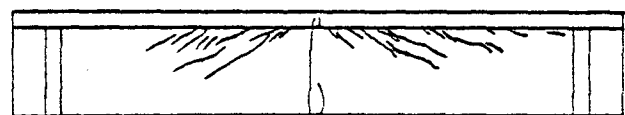
0,593



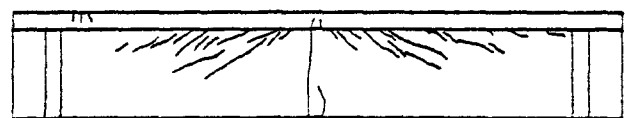
0,667



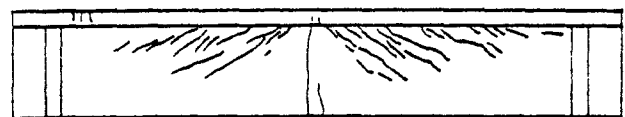
0,704



0,741



0,814



0,889

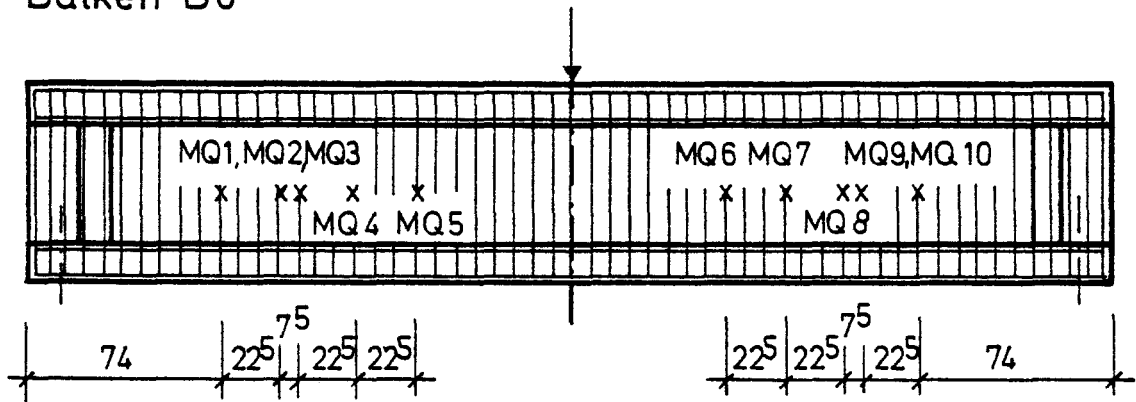


0,926

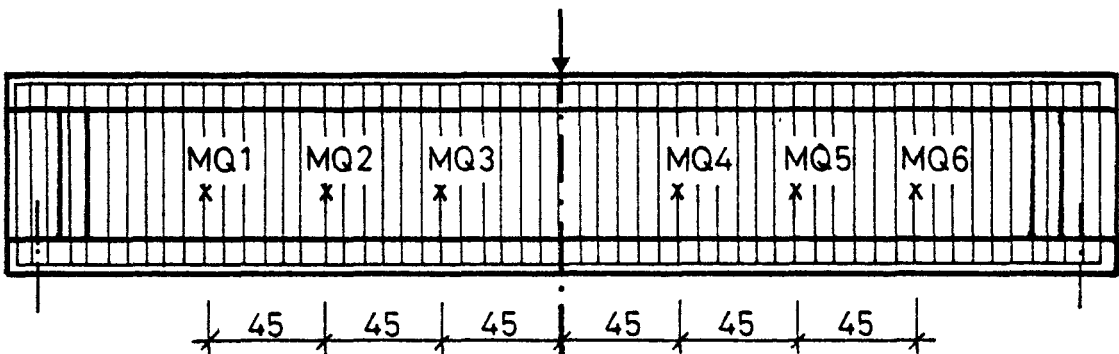


0,963

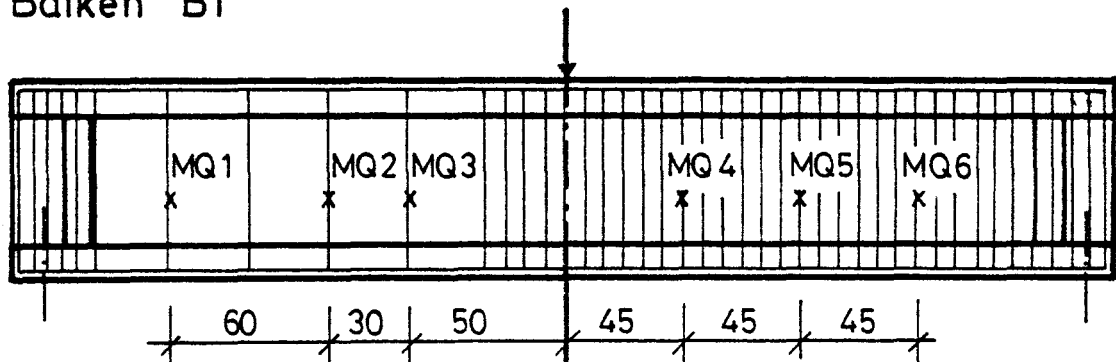
Balken B0



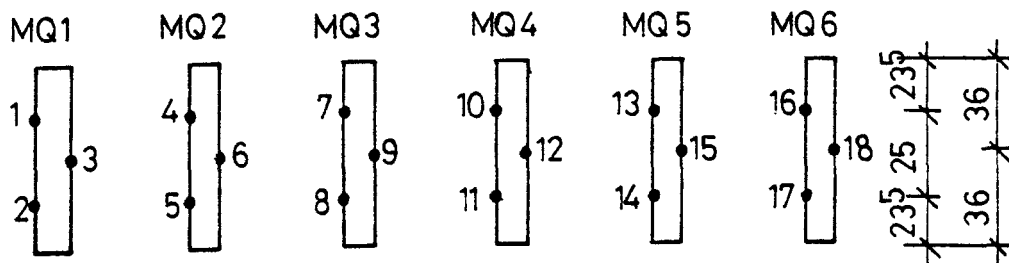
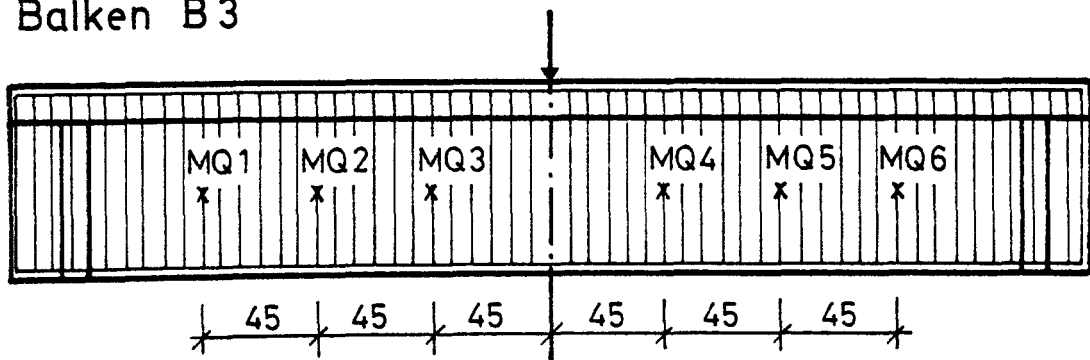
Balken B2



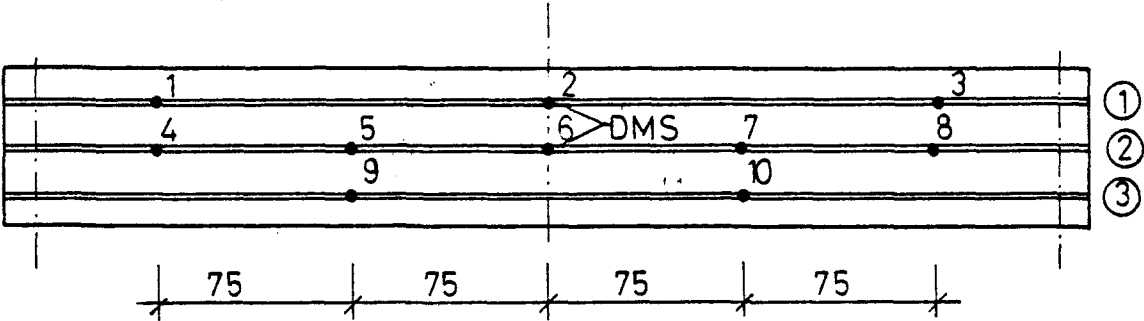
Balken B1



Balken B3

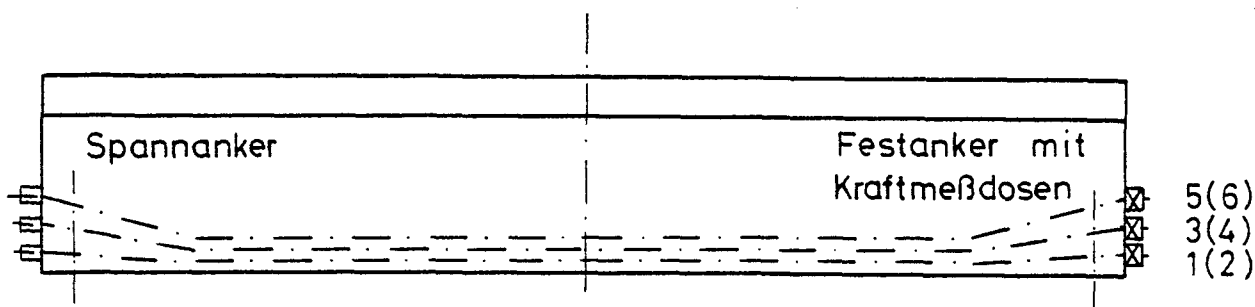


Balken B1, B2, B0

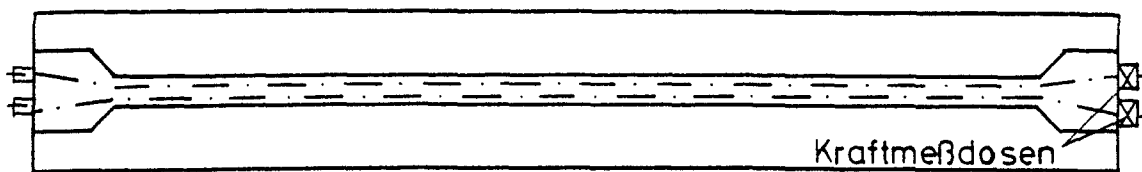


Anlage A3.2: Dehnmeßstreifen auf den Spanngliedern bei Balken B1, B2, B0

Balken B3 (Ansicht)

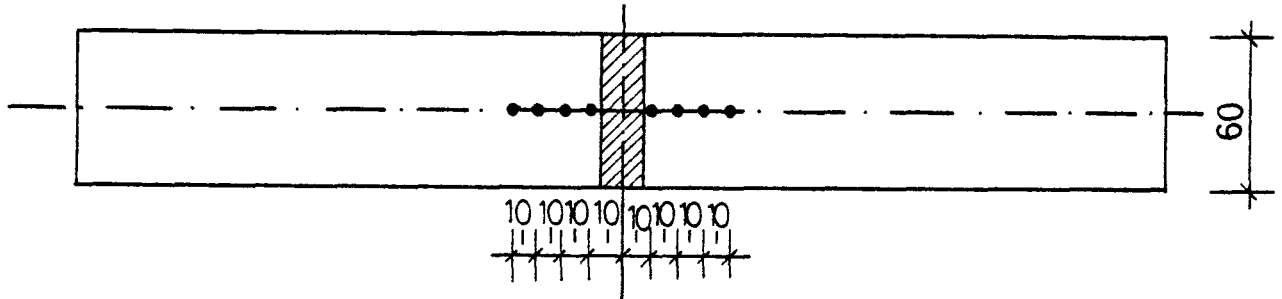


Balken B3 (Aufsicht)

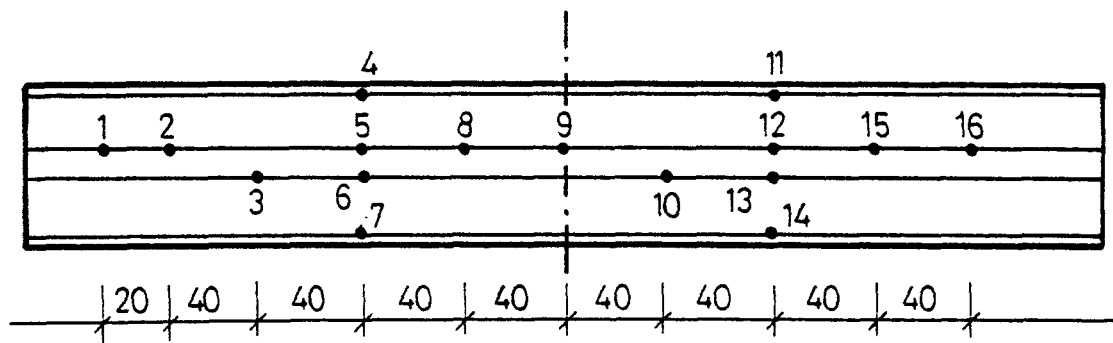


Anlage A3.3: Anordnung der Kraftmeßdosen bei Balken B3

### Betonmeßstellen (Oberseite)

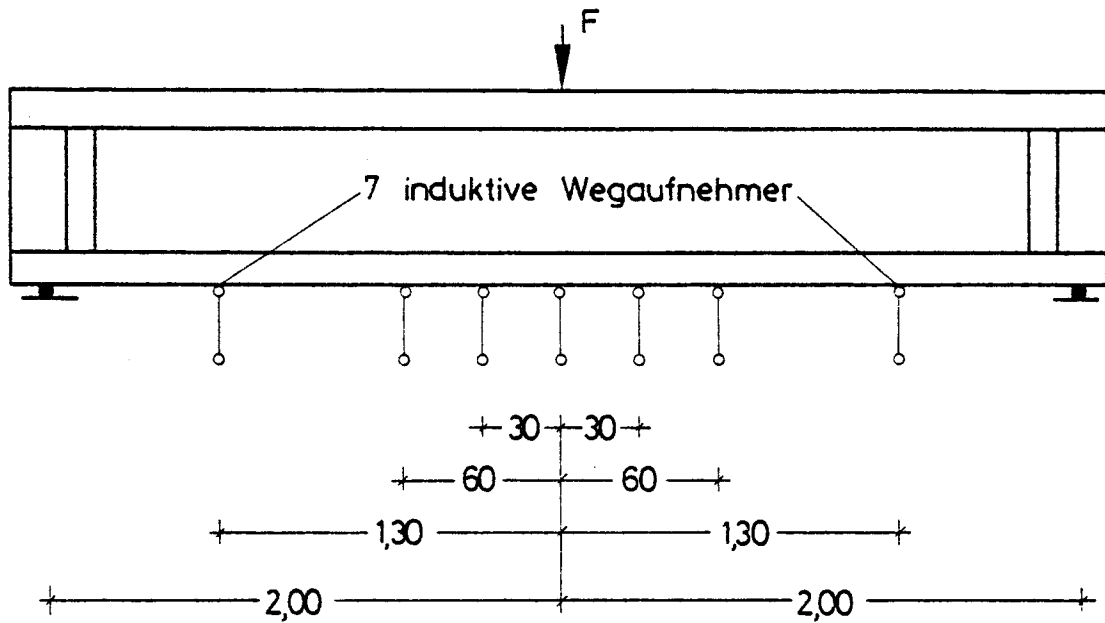


Anlage A3.5: Betonmeßstellen in der Druckzone  
(Setzdehnungsmesser)

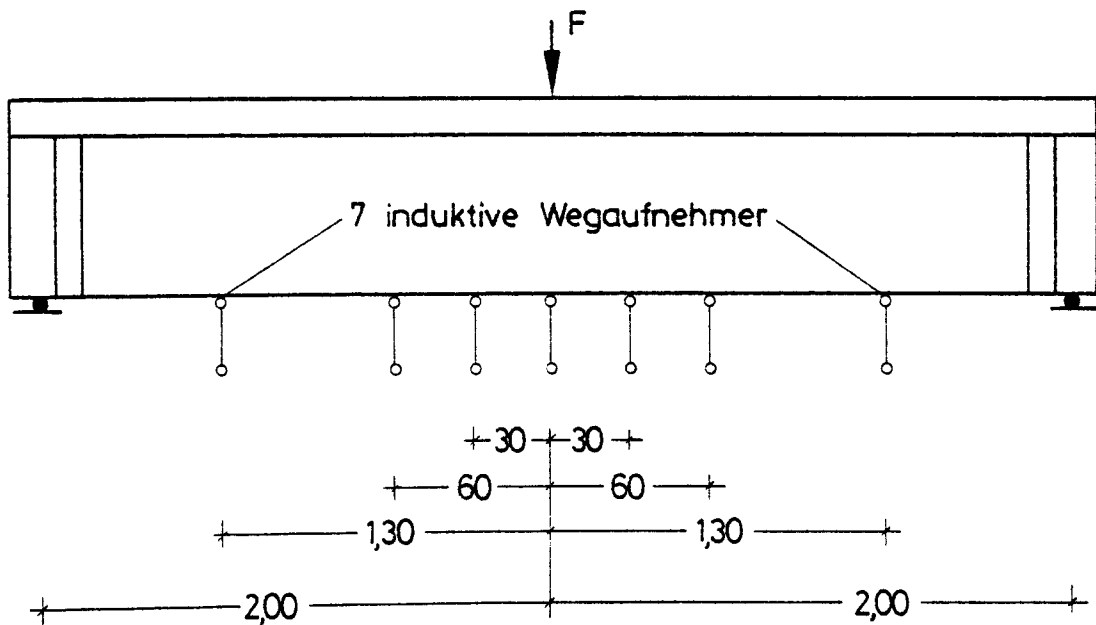


Anlage A3.4: DMS auf Betonstahl-Längsbewehrung in der  
vorgedrückten Zugzone (Balken 2)

Balken B0, B1, B2

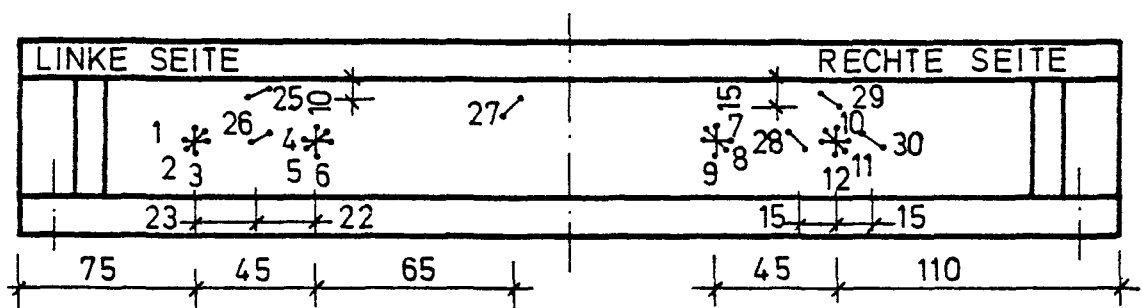


Balken B3

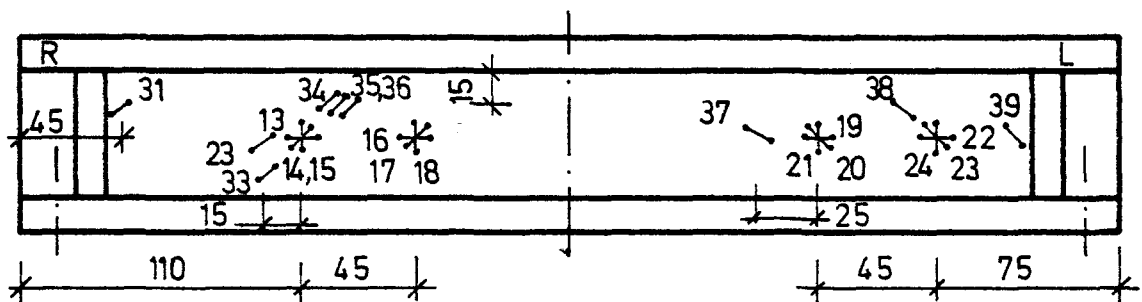


Anlage A3.6: Anordnung der Weggeber zur Meßung der Durchbiegung

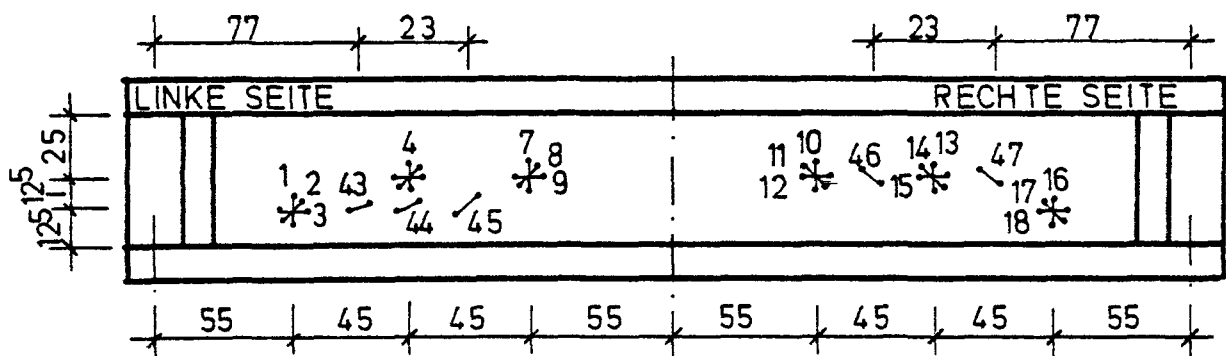
# Vorderseite B0



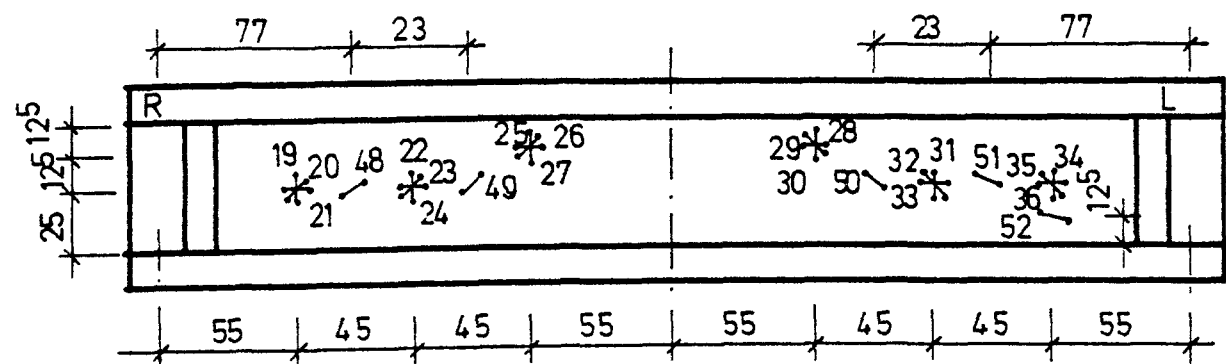
# Rückseite B0



# Vorderseite B1

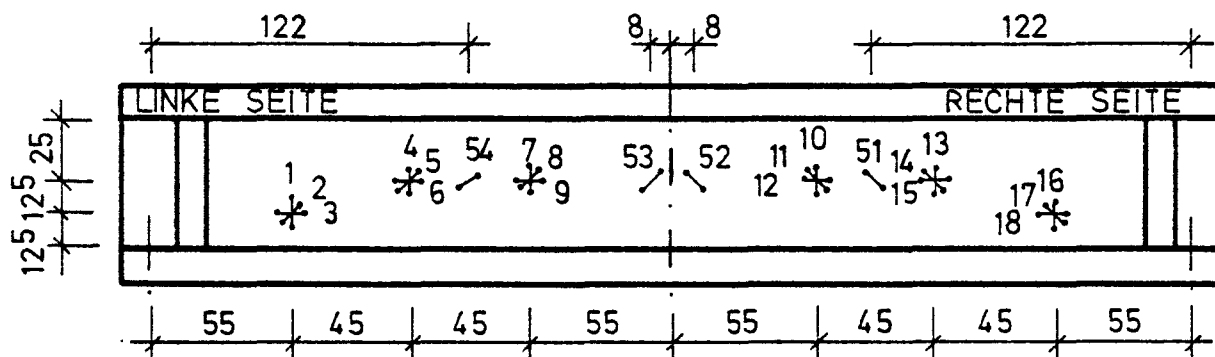


# Rückseite B1

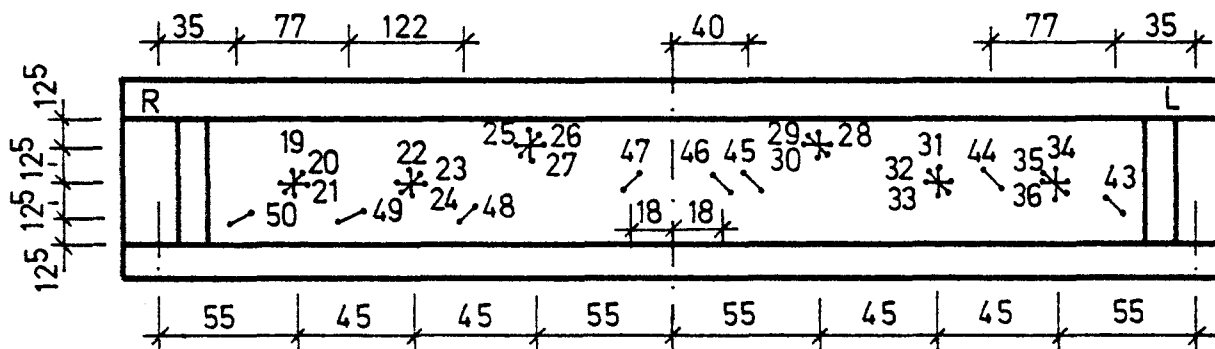


Anlage A 3.7a: Betonmeßstellen im Stegbereich

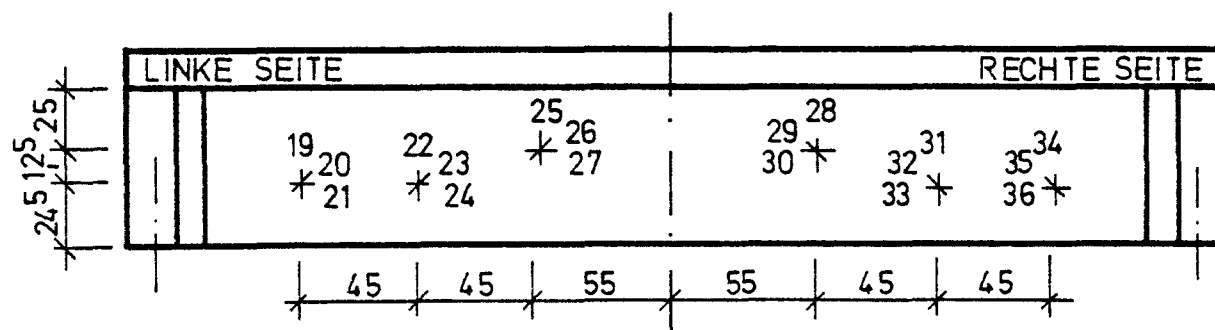
## Vorderseite B2



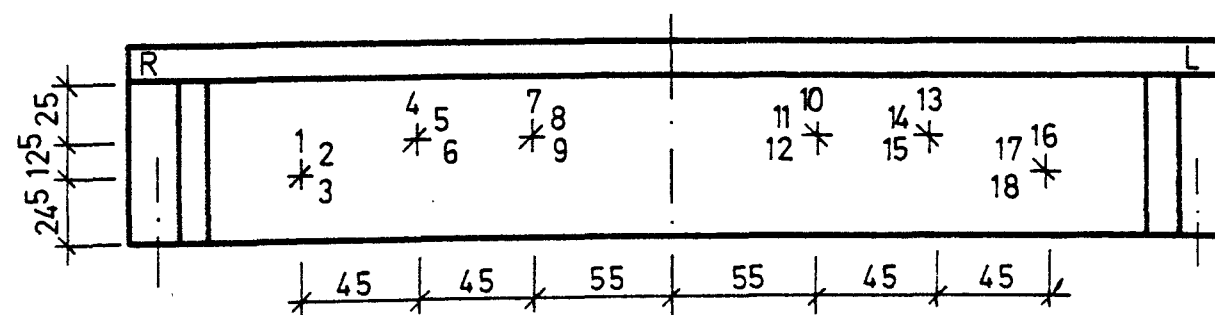
## Rückseite B2



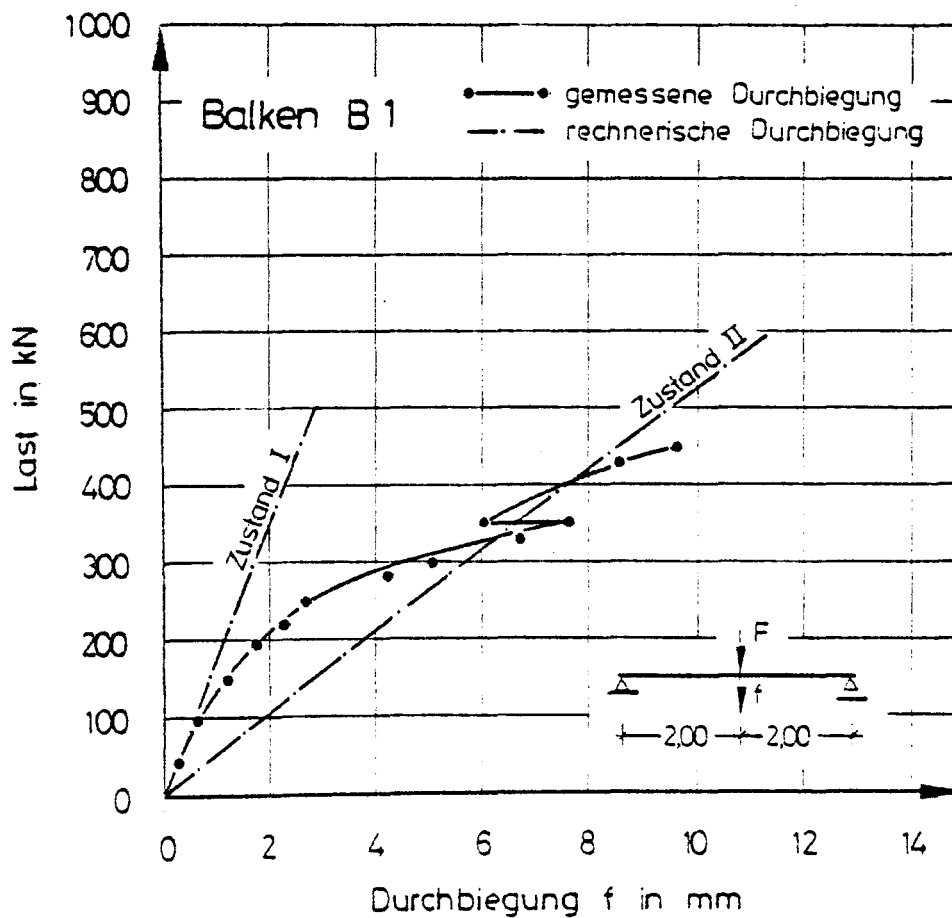
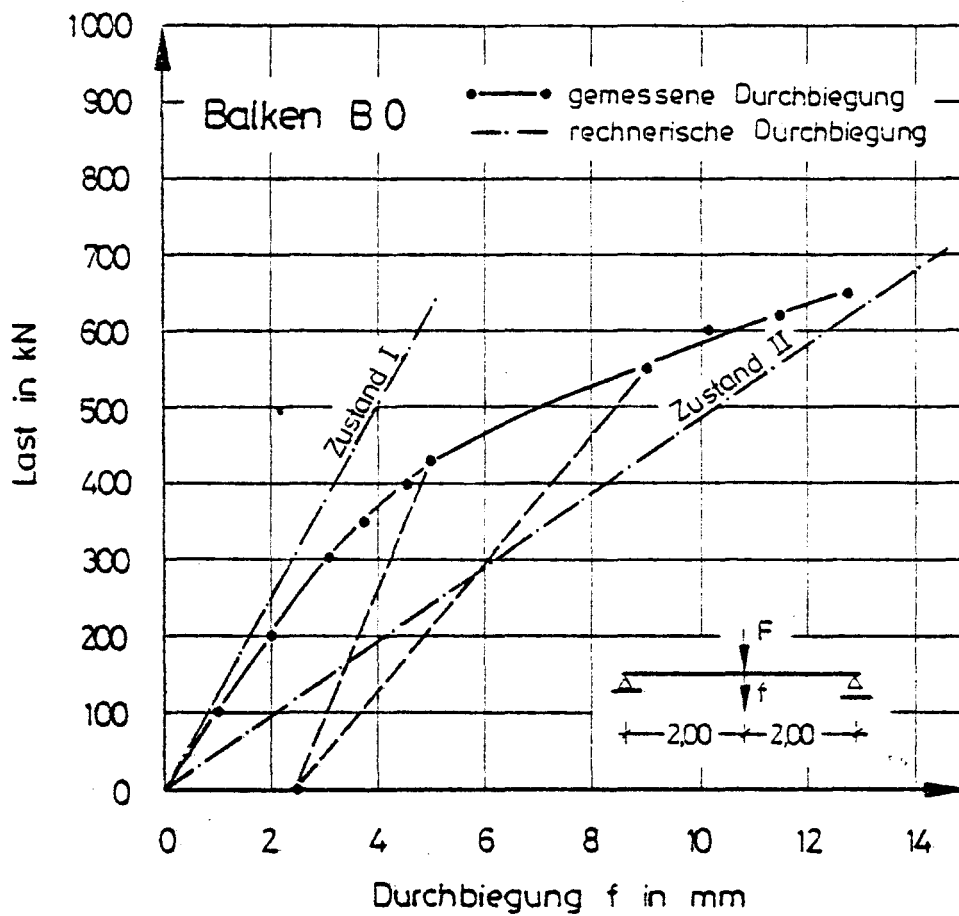
## Vorderseite B3



## Rückseite B3

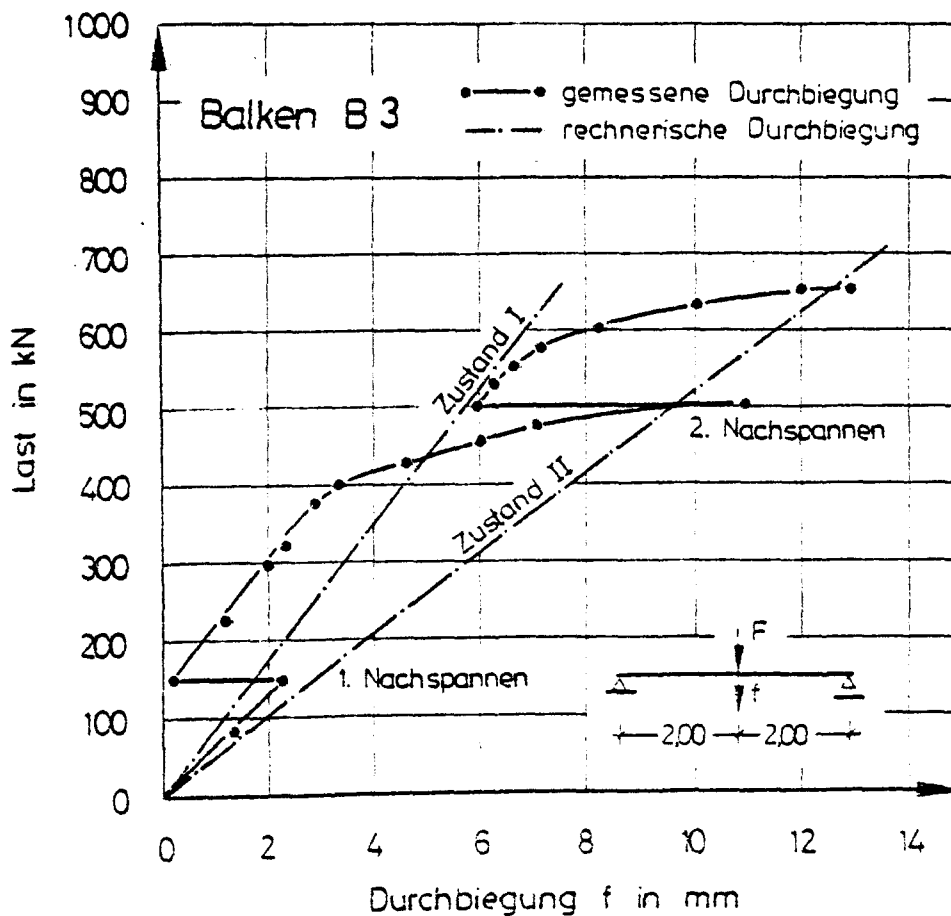
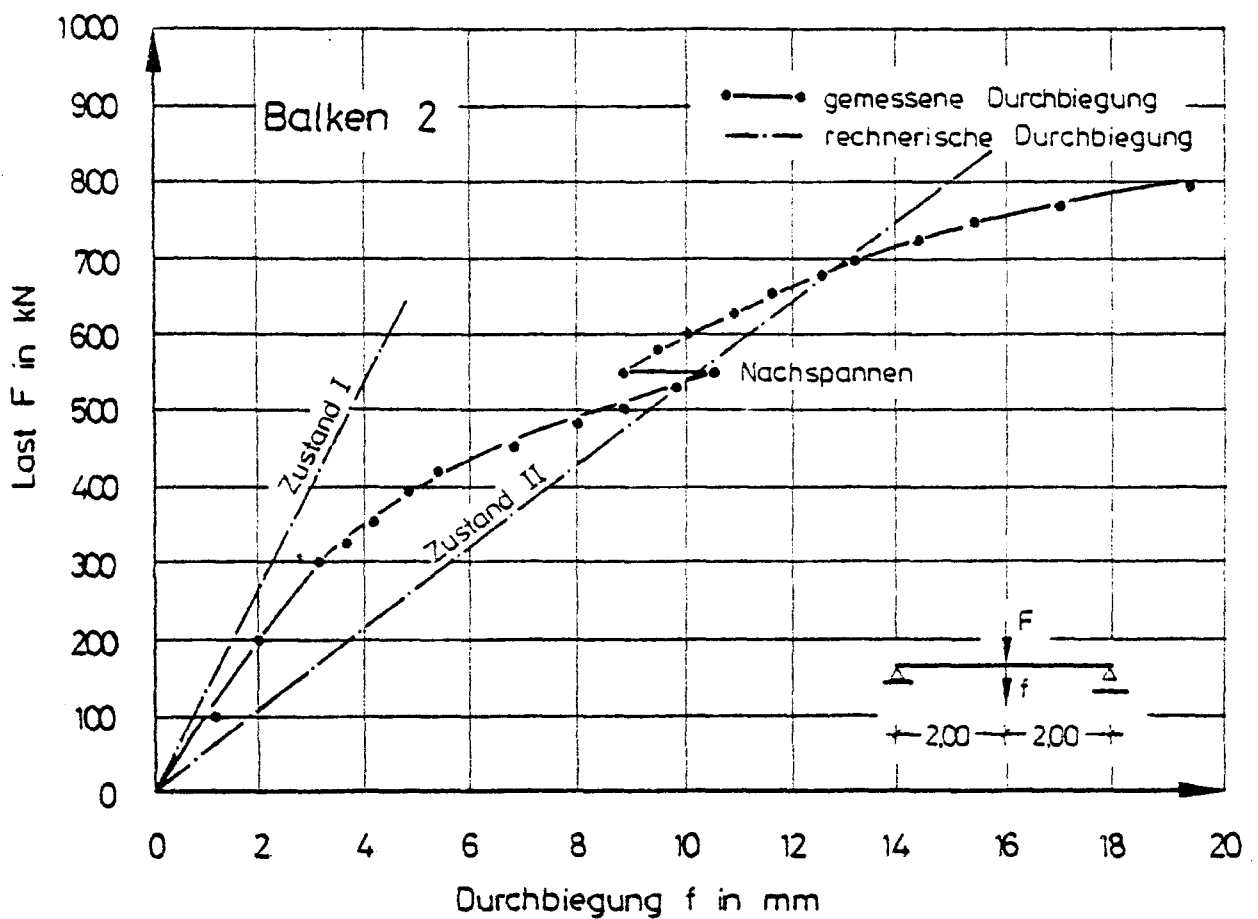


Anlage A 3.7b: Betonmeßstellen im Stegbereich



Anlage A5.1: Vergleich der rechnerischen und gemessenen Durchbiegung





Anlage A5.2: Vergleich der rechnerischen und gemessenen Durchbiegung

Balken B1		Schubrisse im Steg in 1/100 mm						Biegerisse in Höhe der Bewehrung		
P	P/P <sub>U</sub>	Links			Rechts			Mitte		
		$\Sigma w_i$	$w_m$	max w	$\Sigma w_i$	$w_m$	max w	$\Sigma w_i$	$w_m$	max w
200	0,444	-	-	-	-	-	-	14	4	5
250	0,555	152	31	47	9	5	6	38	5	8
300	0,667	246	57	81	13	6	7	69	9	12
325	0,722	573	76	141	26	6	7	83	9	13
350	0,778	670	89	151	30	6	8	28	3	5
375	0,833	739	98	161	30	6	8	28	4	6

### Balken B2

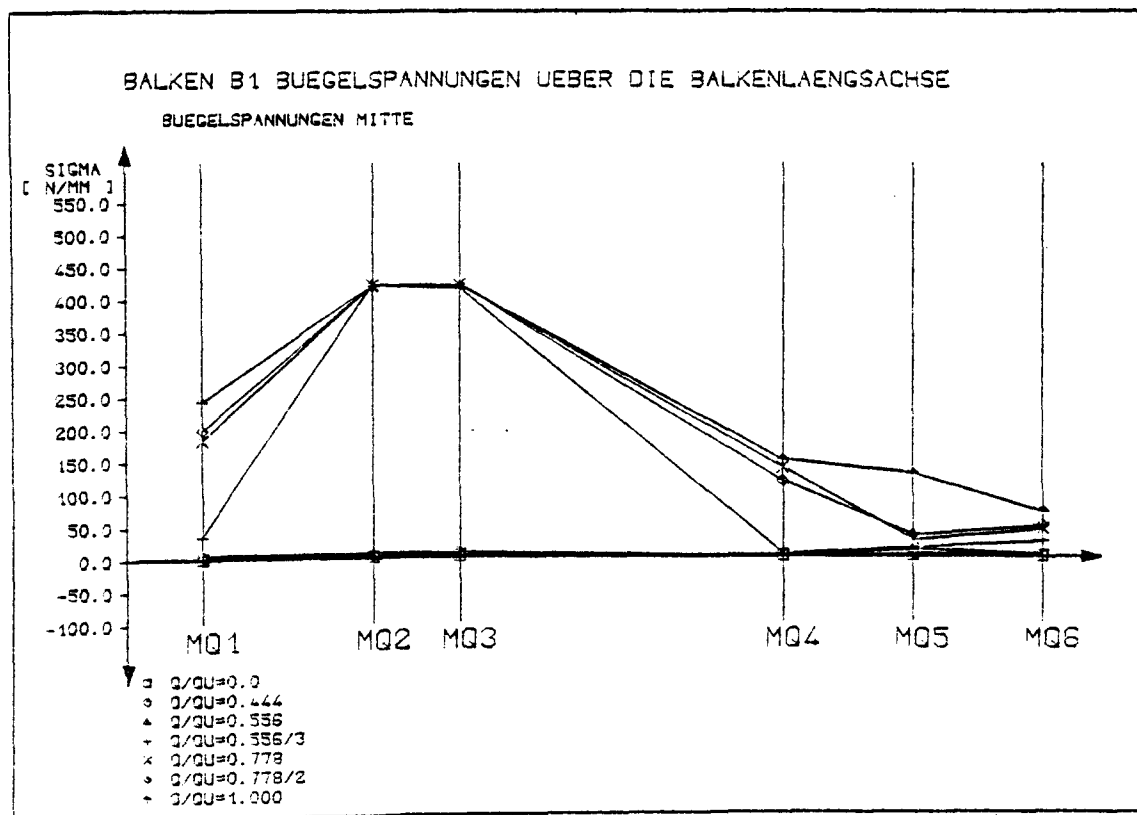
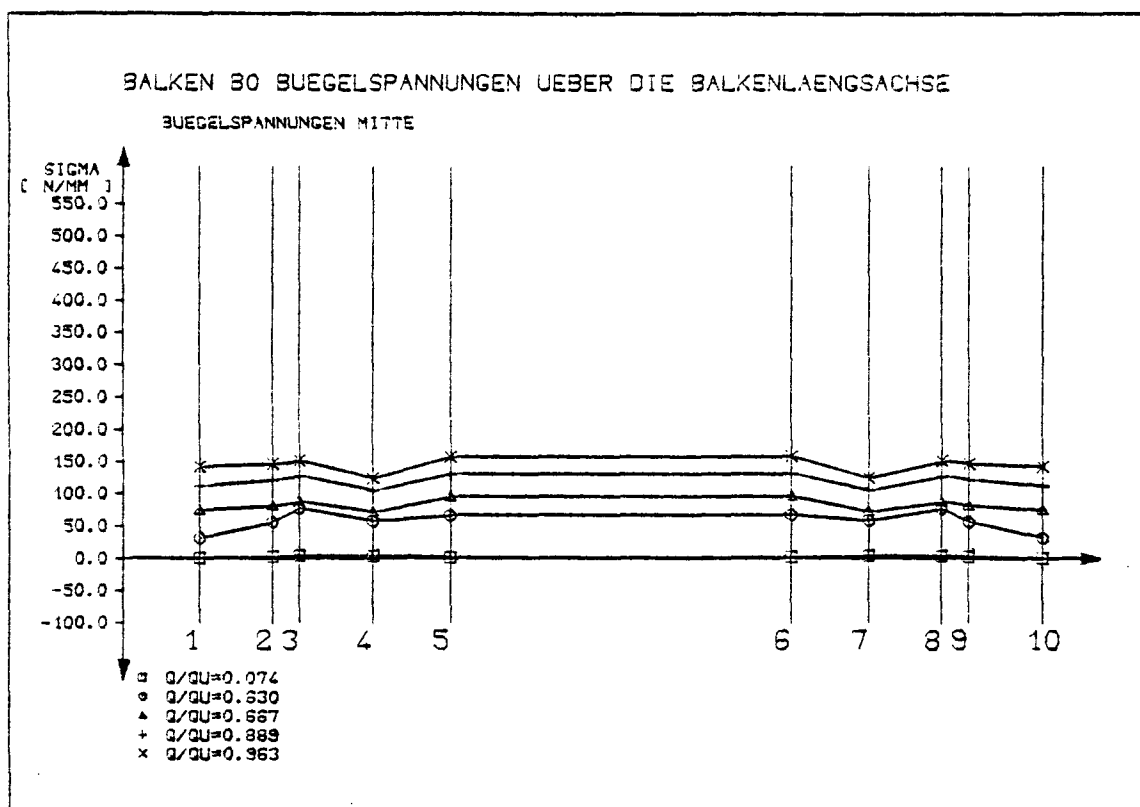
350	0,437	74	8	12	27	4	5	-	-	-
425	0,531	142	10	14	49	6	8	5	5	5
550	0,687	189	14	18	71	9	12	173	22	39
625	0,781	223	16	21	83	10	15	113	14	40
700	0,875	274	20	24	99	12	20	163	20	56
750	0,937	318	23	28	118	15	23	213	27	58

### Balken B3

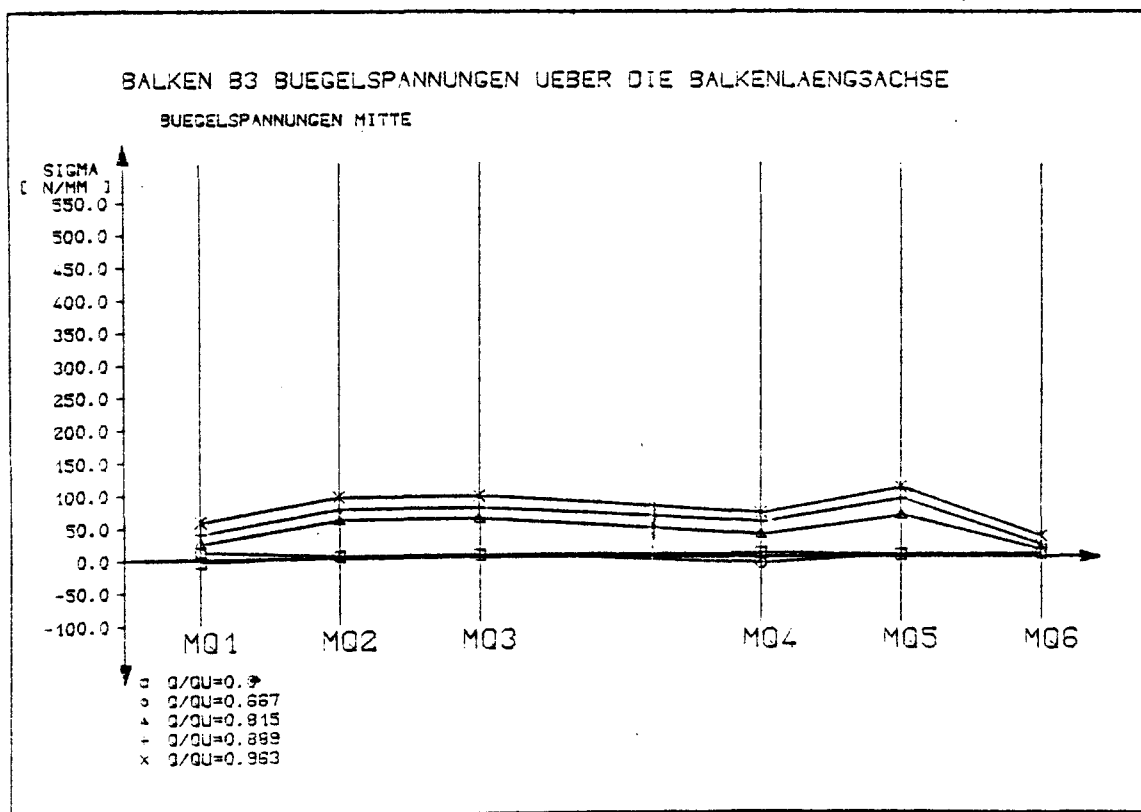
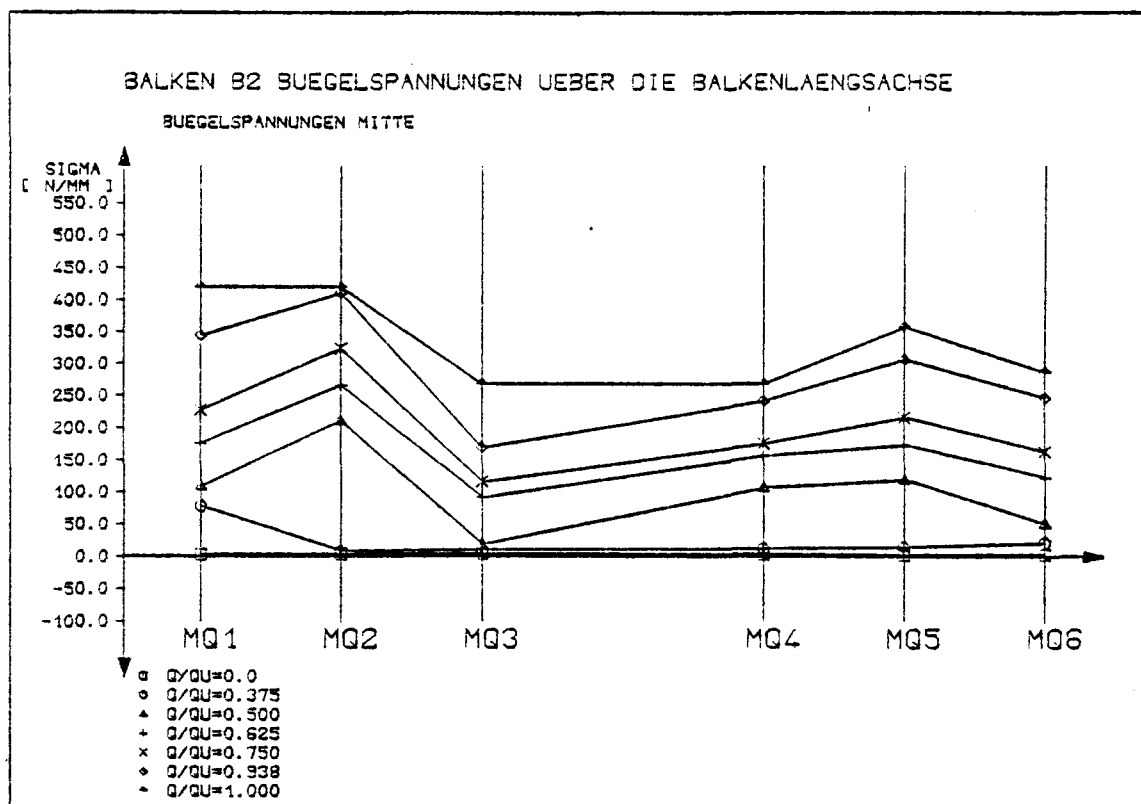
400	0,593	-	-	-	-	-	-	3	3	3
425	0,630	7	4	4	-	-	-	56	19	36
500	0,741	38	8	14	44	7	14	94	31	50
550	0,815	45	8	14	56	9	16	143	48	86
600	0,889	69	9	18	77	10	16	280	93	162
650	0,963	78	10	20	95	12	18	558	186	254

### Balken B0

375	0,556	3	3	3	6	3	3	-	-	-
400	0,593	3	3	3	15	5	6	-	-	-
450	0,667	57	10	14	68	14	16	-	-	-
550	0,815	85	14	22	95	19	23	-	-	-
600	0,889	97	16	24	116	19	27	-	-	-
625	0,926	116	19	30	127	21	34	-	-	-



Anlage A5.4: Bügelspannungen über Längsachse



Anlage A 5.5: Bügelspannungen über Längsachse

VERSUCHSBALKEN B0

\*\*\*\*\*

SPANNSTAHLDEHNUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.000 0.148 0.296 0.444 0.519 0.593 0.630 0.000 0.000 0.296 0.667 0.815 0.889 0.926 0.963

1	0.000	0.020	0.046	0.112	0.396	0.540	0.604	0.107	0.180	0.451	0.800	0.983	1.112	1.215	1.365
2	0.000	0.013	0.020	0.047	0.099	0.235	0.331	0.124	0.150	0.330	0.590	0.769	0.882	0.966	1.068
3	0.000	0.007	0.013	0.023	0.197	0.357	0.417	0.126	0.183	0.340	0.624	0.762	0.856	0.918	1.004
4	0.000	0.008	0.020	0.064	0.303	0.407	0.460	0.122	0.150	0.293	0.585	0.736	0.836	0.892	0.956
5	0.000	0.021	0.044	0.088	0.340	0.472	0.529	0.089	0.100	0.328	0.679	0.844	0.944	1.004	1.086
6	0.000	0.011	0.022	0.040	0.083	0.322	0.413	0.146	0.180	0.353	0.672	0.822	0.940	1.005	1.085
7	0.000	0.011	0.025	0.056	0.169	0.275	0.329	0.139	0.196	0.353	0.578	0.717	0.842	0.945	1.094
8	0.000	0.009	0.020	0.063	0.188	0.232	0.260	0.078	0.066	0.106	0.222	0.274	0.304	0.327	0.375
9	0.000	0.002	0.003	0.016	0.100	0.300	0.364	0.086	0.121	0.241	0.496	0.618	0.707	0.763	0.836
10	0.000	0.001	0.002	0.014	0.041	0.150	0.231	0.129	0.154	0.238	0.499	0.627	0.732	0.793	0.851

DURCHBIEGUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.000 0.148 0.296 0.444 0.519 0.593 0.630 0.000 0.000 0.296 0.667 0.815 0.889 0.926 0.963

1	0.000	0.642	1.313	1.945	2.318	2.851	3.104	0.985	1.572	3.005	4.368	5.035	5.657	6.149	6.816
2	0.000	0.861	1.821	2.706	3.284	4.174	4.617	1.517	2.358	4.428	6.726	7.915	9.080	9.980	11.189
3	0.000	0.920	1.920	2.891	3.512	4.483	4.990	1.642	2.617	4.841	7.398	8.756	10.095	11.095	12.458
4	0.000	0.965	2.010	2.995	3.642	4.627	5.134	1.657	2.692	4.920	7.557	8.950	10.343	11.388	12.796
5	0.000	0.965	2.000	2.950	3.577	4.522	5.025	1.592	2.592	4.871	7.438	8.796	10.144	11.144	12.483
6	0.000	0.955	1.924	2.788	3.374	4.242	4.697	1.500	2.343	4.515	6.823	8.015	9.192	10.076	11.273
7	0.000	0.796	1.505	2.077	2.449	2.985	3.245	1.010	1.520	3.122	4.490	5.138	5.791	6.276	6.949

BUEGELDEHNUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.000 0.148 0.296 0.444 0.519 0.593 0.630 0.000 0.000 0.296 0.667 0.815 0.889 0.926 0.963

1	0.000	0.004	0.003	0.020	0.138	0.180	0.192	0.061	0.060	0.085	0.182	0.232	0.256	0.266	0.270
2	0.000	-0.007	-0.017	-0.015	-0.007	0.060	0.125	0.096	0.110	0.139	0.243	0.298	0.342	0.368	0.401
3	0.000	0.011	0.018	0.037	0.058	0.113	0.150	0.109	0.183	0.244	0.404	0.522	0.633	0.701	0.777
4	0.000	0.012	0.019	0.040	0.082	0.190	0.285	0.130	0.201	0.314	0.580	0.727	0.837	0.918	1.026
5	0.000	0.000	-0.001	0.008	0.027	0.109	0.230	0.100	0.161	0.231	0.501	0.658	0.751	0.801	0.845
6	0.000	0.009	0.017	0.034	0.063	0.201	0.301	0.106	0.162	0.248	0.498	0.630	0.752	0.816	0.879
7	0.000	0.011	0.021	0.042	0.060	0.128	0.200	0.112	0.152	0.267	0.500	0.643	0.752	0.809	0.864
8	0.000	-0.004	-0.006	0.018	0.078	0.260	0.330	0.140	0.231	0.270	0.524	0.658	0.759	0.806	0.855
9	0.000	0.013	0.025	0.062	0.117	0.269	0.297	0.107	0.116	0.228	0.402	0.495	0.580	0.640	0.711
10	0.000	0.006	0.012	0.031	0.060	0.161	0.189	0.090	0.106	0.191	0.337	0.419	0.488	0.534	0.588
11	0.000	0.000	0.000	0.006	0.025	0.087	0.249	0.104	0.140	0.195	0.378	0.466	0.525	0.553	0.577
12	0.000	0.009	0.017	0.032	0.055	0.188	0.234	0.088	0.086	0.163	0.333	0.413	0.474	0.519	0.580
13	0.000	0.000	0.005	0.020	0.059	0.124	0.168	0.095	0.069	0.141	0.279	0.363	0.422	0.460	0.504
14	0.000	-0.008	-0.012	-0.009	0.034	0.219	0.274	0.104	0.111	0.184	0.392	0.483	0.550	0.593	0.642
15	0.000	0.014	0.028	0.043	0.082	0.163	0.217	0.132	0.162	0.264	0.406	0.496	0.576	0.634	0.703
16	0.000	0.001	0.005	0.020	0.246	0.334	0.384	0.094	0.099	0.210	0.446	0.569	0.629	0.660	0.694
17	0.000	-0.006	-0.007	0.001	0.125	0.307	0.366	0.124	0.147	0.278	0.528	0.638	0.712	0.766	0.825
18	0.000	0.020	0.035	0.067	0.291	0.380	0.408	0.101	0.137	0.265	0.495	0.603	0.670	0.718	0.792
19	0.000	0.861	1.821	2.706	3.284	4.174	4.617	1.517	2.358	4.428	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
20	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.311	-0.234	-0.195	-0.138	-0.124	-0.111	-0.091	0.000	0.000	-0.100	-0.100
21	0.000	0.030	0.045	0.069	0.087	0.097	0.108	-0.015	-0.092	-0.018	0.081	0.125	0.154	0.163	0.175
22	0.000	0.067	0.135	0.220	0.267	0.313	0.347	0.020	-0.026	0.121	0.396	0.577	0.747	0.839	0.932
23	0.000	0.018	0.022	0.038	0.049	0.046	0.057	-0.022	-0.079	-0.040	0.022	0.049	0.069	0.075	0.077
24	0.000	0.033	0.053	0.083	0.102	0.119	0.131	-0.004	-0.076	0.011	0.117	0.165	0.195	0.203	0.213
25	0.000	-0.004	-0.018	-0.015	-0.013	-0.025	-0.026	-0.028	-0.023	-0.028	-0.031	-0.031	-0.033	-0.033	-0.032
26	0.000	0.076	0.156	0.255	0.311	0.374	0.414	0.042	0.009	0.178	0.492	0.709	0.900	1.019	1.140
27	0.000	0.050	0.097	0.151	0.184	0.216	0.239	0.004	-0.050	0.060	0.238	0.326	0.411	0.453	0.505
28	0.000	0.025	0.045	0.067	0.085	0.091	0.104	-0.010	-0.063	0.000	0.084	0.121	0.148	0.159	0.165
29	0.000	0.920	1.920	2.891	3.512	4.483	4.990	1.642	2.617	4.841	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

VERSUCHSBALKEN BC

\*\*\*\*\*

ERMITTELTE BETONLAENGSDEHNUNG IN PROMILLE

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/QU

MESZSTELLE 0.000 0.296 0.444 0.519 0.593 0.630 0.000 0.000 0.296 0.667 0.815 0.889 0.889

1	0.000	0.003	0.000	0.023	0.056	-	-	0.018	0.084	0.157	0.247	0.308	0.368	0.423
4	0.000	-0.001	0.007	0.006	0.009	-	-	0.005	-0.017	-0.035	-0.033	-0.020	-0.015	-0.016
7	0.000	-0.001	-0.015	-0.015	-0.015	-	-	-0.017	-0.033	-0.036	-0.059	-0.051	-0.050	-0.050
10	0.000	0.003	-0.008	-0.011	-0.020	-	-	-0.006	-0.025	-0.038	-0.066	-0.074	-0.088	-0.098
22	0.000	0.023	-0.007	0.021	0.062	-	-	-0.003	0.576	0.663	0.783	0.845	0.920	0.994
19	0.000	0.018	0.011	-0.010	-0.029	-	-	0.003	-0.014	-0.043	-0.039	-0.048	-0.052	-0.071
16	0.000	0.007	-0.003	-0.011	-0.039	-	-	-0.023	-0.053	-0.078	-0.087	-0.082	-0.097	-0.116
13	0.000	0.011	-0.014	-0.025	-0.042	-	-	-0.025	-0.041	-0.061	-0.085	-0.096	-0.107	-0.119

VERSUCHSBALKEN BO

\*\*\*\*\*

ERMITTELTE BETONQUERDEHNUNG IN PROMILLE

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/QU

MESZSTELLE 0.000 0.296 0.444 0.519 0.593 0.630 0.000 0.000 0.296 0.667 0.815 0.889 0.889

3	0.000	-0.070	0.076	0.032	0.122	-	-	0.031	-0.017	0.092	0.153	0.204	0.185	0.259
6	0.000	-0.055	0.002	-0.048	0.033	-	-	-0.008	-0.103	0.025	0.041	0.078	0.096	0.116
9	0.000	0.301	0.270	0.245	0.337	-	-	0.309	0.295	0.314	0.313	0.334	0.343	0.364
12	0.000	0.009	0.023	0.020	0.019	-	-	0.010	-0.012	0.005	0.003	0.002	-0.013	0.001
24	0.000	0.004	-0.007	0.053	0.083	-	-	0.029	0.047	0.058	0.128	0.166	0.185	0.193
21	0.000	-0.020	-0.030	-0.027	-0.017	-	-	-0.037	-0.042	-0.035	-0.005	-0.026	-0.015	-0.002
18	0.000	0.015	0.007	0.008	0.005	-	-	0.003	0.000	-0.006	-0.013	-0.024	-0.031	-0.030
15	0.000	0.008	0.006	-0.015	-0.018	-	-	-0.008	-0.020	-0.017	-0.039	-0.042	-0.035	-0.051

VERSUCHSBALKEN B0

\*\*\*\*\*

ERMITTELTE BETONTRAJEKTORIENDEHNUNG IN PROMILLE

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/QU

MESZSTELLE 0.000 0.296 0.444 0.519 0.593 0.630 0.000 0.000 0.296 0.667 0.815 0.889 0.889

26	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	-0.082	-0.111	-0.168	-0.191	-0.230	-0.257
2	0.000	-0.030	-0.047	-0.048	-0.083	-	-	-0.024	-0.107	-0.205	-0.324	-0.358	-0.457	-0.516
5	0.000	-0.005	-0.053	-0.032	-0.058	-	-	-0.016	-0.061	-0.089	-0.142	-0.159	-0.212	-0.238
8	0.000	-0.029	-0.026	-0.069	-0.078	-	-	-0.034	-0.099	-0.133	-0.192	-0.202	-0.238	-0.265
11	0.000	-0.025	-0.018	-0.057	-0.091	-	-	-0.040	-0.076	-0.106	-0.163	-0.192	-0.223	-0.258
25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	-0.556	-0.573	-0.600	-0.621	-0.652	-0.656
27	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	-0.395	-0.436	-0.508	-0.549	-0.609	-0.638
28	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	-0.065	-0.090	-0.151	-0.179	-0.227	-0.265
29	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	0.353	0.315	0.269	0.226	0.193	0.150
38	-	-	-	-	-	-	-	-	0.365	0.323	0.286	0.255	0.219	0.216
35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.307	0.281	0.220	0.204	0.141	0.083
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.184	-0.239	-0.284	-0.319	-0.377	-0.420
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.170	-0.189	-0.255	-0.290	-0.331	-0.352
23	0.000	-0.003	-0.050	-0.087	-0.120	-	-	-0.061	-0.072	-0.148	-0.204	-0.243	-0.316	-0.324
20	0.000	-0.019	-0.054	-0.058	-0.088	-	-	-0.049	-0.133	-0.158	-0.238	-0.292	-0.357	-0.405
17	0.000	0.034	-0.027	-0.029	-0.056	-	-	-0.018	0.276	-0.065	-0.123	-0.147	-0.192	-0.219
14	0.000	-0.014	-0.102	-0.073	-0.110	-	-	-0.114	-0.127	-0.118	-0.193	-0.223	-0.258	-0.287
39	-	-	-	-	-	-	-	-	0.111	0.055	0.033	-0.010	-0.052	-0.107
37	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.536	-0.172	-0.212	-0.225	-0.267	-0.294
36	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.642	-0.701	-0.789	-0.810	-0.864	-0.865
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.539	-0.565	0.000	0.000	-0.662	-0.703

Anlage A6.2

VERSUCHSBALKEN B0  
\*\*\*\*\*

HAUPTDEHNUNGEN DES BETONS  
\*\*\*\*\*  
1. ZEILE = EPSILON MAX IN PROMILLE  
2. ZEILE = EPSILON MIN IN PROMILLE  
3. ZEILE = WINKEL ZWISCHEN EPSILON MIN UND DER LAENGSSACHSE

		BELASTUNGSGRAD Q/QU												
SCHNITT	LAGE	0.000	0.296	0.444	0.519	0.593	0.630	0.000	0.000	0.296	0.667	0.815	0.899	0.989
<hr/>														
1	VORN MIT	0.000	0.003	0.131	0.103	0.264	- - -	0.073	0.183	0.456	0.726	0.872	1.016	1.202
		0.000	-0.070	-0.055	-0.048	-0.086	- - -	-0.024	-0.116	-0.207	-0.326	-0.360	-0.463	-0.520
		-45.000	-87.261	32.956	43.295	39.570	- - -	41.183	54.385	47.317	47.563	47.420	48.555	47.733
1	HINTEN M	0.000	0.033	0.036	0.162	0.265	- - -	0.089	0.777	0.952	1.192	1.327	1.496	1.595
		0.000	-0.006	-0.050	-0.086	-0.120	- - -	-0.063	-0.154	-0.231	-0.281	-0.316	-0.391	-0.408
		-45.000	59.966	45.000	41.324	43.439	- - -	38.900	62.297	60.374	58.204	57.199	56.468	56.791
2	VORN MIT	0.000	0.007	0.062	0.008	0.101	- - -	0.014	-0.017	0.084	0.155	0.223	0.299	0.345
		0.000	-0.063	-0.053	-0.050	-0.059	- - -	-0.017	-0.103	-0.094	-0.147	-0.165	-0.219	-0.245
		-45.000	-69.787	46.245	78.917	40.681	- - -	57.073	89.334	35.173	37.890	37.696	38.802	38.546
2	HINTEN M	0.000	0.025	0.039	0.022	0.042	- - -	0.021	0.078	0.080	0.195	0.218	0.291	0.334
		0.000	-0.027	-0.058	-0.059	-0.088	- - -	-0.055	-0.134	-0.158	-0.239	-0.292	-0.358	-0.407
		-45.000	68.274	57.367	51.072	42.363	- - -	61.003	48.797	44.037	42.750	43.765	43.363	42.326
3	VORN MIT	0.000	0.384	0.337	0.340	0.458	- - -	0.389	0.413	0.462	0.496	0.535	0.578	0.627
		0.000	-0.084	-0.082	-0.110	-0.136	- - -	-0.097	-0.151	-0.184	-0.242	-0.252	-0.285	-0.313
		-45.000	24.925	23.564	27.379	26.816	- - -	23.919	27.255	28.622	29.877	30.367	31.465	31.936
3	HINTEN M	0.000	0.034	0.031	0.028	0.028	- - -	0.005	0.277	-0.002	0.032	0.045	0.068	0.079
		0.000	-0.012	-0.027	-0.031	-0.062	- - -	-0.025	-0.330	-0.084	-0.132	-0.151	-0.196	-0.225
		-45.000	-40.067	40.109	35.471	30.286	- - -	15.804	-42.497	16.076	31.561	36.427	37.772	36.795
4	VORN MIT	0.000	0.037	0.037	0.068	0.092	- - -	0.045	0.039	0.076	0.104	0.125	0.126	0.167
		0.000	-0.025	-0.022	-0.059	-0.093	- - -	-0.041	-0.076	-0.109	-0.167	-0.197	-0.227	-0.264
		-45.000	42.236	29.353	37.927	38.920	- - -	39.608	41.775	38.246	37.650	38.155	38.868	38.353
4	HINTEN M	0.000	0.033	0.095	0.033	0.051	- - -	0.081	0.067	0.043	0.071	0.087	0.119	0.120
		0.000	-0.014	-0.103	-0.073	-0.111	- - -	-0.114	-0.128	-0.121	-0.195	-0.225	-0.261	-0.290
		-45.000	46.826	42.087	42.305	40.735	- - -	42.509	41.895	37.219	40.021	40.028	39.552	40.223

Anlage A6.3

VERSUCHSBALKEN B1

\*\*\*\*\*

SPANNSTAHLDEHNUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE	0.000	0.111	0.222	0.333	0.444	0.500	0.556	0.556	0.611	0.667	0.722	0.778	0.778	0.889	0.944	1.000
								3					2			
1	0.594	0.607	0.624	0.647	0.672	0.710	0.761	0.795	0.827	0.882	0.957	1.009	1.538	1.609	1.659	1.708
2	0.603	0.616	0.636	0.666	0.696	0.734	0.791	0.821	0.851	0.912	0.990	1.041	1.577	1.644	1.695	1.745
3	0.593	0.604	0.621	0.644	0.670	0.709	0.765	0.794	0.823	0.885	0.967	1.020	1.508	1.579	1.636	1.698
4	0.632	0.643	0.662	0.685	0.712	0.754	0.810	0.842	0.872	0.932	1.012	1.064	1.537	1.610	1.665	1.728
5	0.546	0.559	0.576	0.599	0.626	0.663	0.721	0.758	0.790	0.843	0.924	0.975	1.476	1.547	1.601	1.653
6	0.585	0.600	0.618	0.645	0.676	0.718	0.776	0.803	0.834	0.891	0.971	1.024	1.513	1.584	1.634	1.685
7	0.631	0.646	0.667	0.698	0.730	0.772	0.833	0.868	0.899	0.962	1.048	1.103	1.634	1.708	1.763	1.817
8	0.592	0.602	0.618	0.639	0.670	0.706	0.764	0.800	0.831	0.891	0.980	1.035	1.557	1.631	1.694	1.764
9	0.586	0.598	0.615	0.643	0.677	0.715	0.771	0.803	0.833	0.892	0.976	1.030	1.544	1.613	1.663	1.713

DURCHBIEGUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE	0.000	0.111	0.222	0.333	0.444	0.500	0.556	0.556	0.611	0.667	0.722	0.778	0.778	0.889	0.944	1.000
								3					2			
1	-0.225	0.315	0.700	1.050	1.415	1.650	1.940	2.690	2.860	3.200	3.990	4.560	3.870	4.655	5.425	6.590
2	-0.335	0.265	0.730	1.175	1.660	2.040	2.520	4.070	4.395	5.105	6.475	7.390	5.910	7.220	8.450	10.295
3	-0.355	0.255	0.725	1.195	1.715	2.145	2.725	4.265	4.615	5.335	6.705	7.625	5.925	7.255	8.445	10.155
4	-0.370	0.225	0.700	1.190	1.715	2.185	2.805	4.275	4.625	5.345	6.680	7.590	5.780	7.090	8.225	9.800
5	-0.350	0.215	0.665	1.115	1.615	2.050	2.595	3.880	4.190	4.865	6.115	6.900	5.215	6.370	7.380	8.745
6	-0.335	0.200	0.620	1.035	1.495	1.875	2.350	3.460	3.720	4.255	5.305	5.970	4.545	5.530	6.405	7.560
7	-0.195	0.195	0.480	0.750	1.055	1.260	1.510	2.140	2.300	2.545	3.000	3.310	2.640	3.120	3.520	4.065

BUEGELDEHNUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE	0.000	0.111	0.222	0.333	0.444	0.500	0.556	0.556	0.611	0.667	0.722	0.778	0.778	0.889	0.944	1.000
								3					2			
1	0.001	0.006	0.011	0.018	0.027	0.033	0.043	0.015	0.020	0.026	0.063	0.089	0.127	0.153	0.175	0.194
2	0.008	0.013	0.017	0.025	0.035	0.041	0.048	1.184	1.280	1.532	2.391	2.893	3.301	4.029	5.206	- - -
3	0.004	0.006	0.007	0.012	0.016	0.019	0.023	0.162	0.165	0.340	0.787	0.866	0.939	1.008	1.079	1.150
4	0.006	0.012	0.019	0.028	0.036	0.039	0.043	0.875	0.895	1.005	1.424	1.495	1.489	1.634	1.729	1.900
5	0.010	0.012	0.015	0.020	0.025	0.030	0.044	1.566	1.904	3.246	4.725	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
6	0.009	0.012	0.013	0.019	0.022	0.026	0.035	2.223	2.448	3.028	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
7	0.007	0.014	0.021	0.035	0.046	0.049	0.050	1.637	1.816	2.145	2.926	3.603	3.919	- - -	- - -	- - -
8	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
9	0.013	0.015	0.019	0.026	0.032	0.029	0.030	1.974	2.130	2.467	2.959	3.288	3.394	3.980	4.405	5.498
10	0.007	0.011	0.016	0.026	0.033	0.030	0.033	0.039	0.038	0.048	0.109	0.160	0.226	0.257	0.362	0.526
11	0.009	0.008	0.006	0.010	0.014	0.016	0.024	0.040	0.040	0.041	0.282	0.301	0.267	0.296	0.309	0.316
12	0.007	0.006	0.002	0.003	0.002	-0.001	0.002	0.020	0.017	0.014	0.621	0.650	0.550	0.643	0.672	0.704
13	0.005	0.006	0.006	0.011	0.018	0.020	0.025	0.180	0.185	0.195	0.203	0.212	0.235	0.260	0.288	0.307
14	0.012	0.007	0.000	0.000	0.000	0.009	0.021	0.031	0.024	0.036	0.420	0.478	0.499	0.558	0.568	0.605
15	0.013	0.013	0.011	0.014	0.024	0.033	0.051	0.070	0.070	0.076	0.112	0.126	0.158	0.182	0.536	0.607
16	0.002	0.002	0.001	0.008	0.018	0.024	0.037	0.164	0.175	0.227	0.293	0.338	0.368	0.432	0.469	0.509
17	0.009	0.008	0.007	0.012	0.015	0.016	0.020	0.379	0.403	0.421	0.463	0.491	0.464	0.536	0.579	0.600
18	0.005	0.006	0.004	0.010	0.013	0.015	0.018	0.117	0.118	0.139	0.183	0.206	0.233	0.265	0.299	0.327

Anlage A 6.4



\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

**◆ 中国书画函授大学肇庆分校**

12/02/2014

HAUPTDEHNUNGEN DES BETONS

1.ZEILE = EPSILON MAX IN PROMILLE  
2.ZEILE = EPSILON MIN IN PROMILLE  
3.ZEILE = WINKEL ZWISCHEN EPSILON MIN UND DER LAENGSSACHSE

		BELASTUNGSGRAD M/MU															
SNITT	LAGE	0.000	0.111	0.222	0.333	0.444	0.500	0.556	0.556	0.611	0.667	0.722	0.778	0.833	0.889	0.944	1.000
		3															
1	VO UN	0.237	0.148	0.135	0.239	0.233	0.223	0.065	0.168	0.188	- - -	0.295	0.282	0.232	0.290	0.177	0.373
		0.003	-0.037	-0.069	-0.053	-0.106	-0.203	-0.169	-0.374	-0.466	- - -	-0.631	-0.767	-0.951	-1.108	-1.177	-1.409
		29.308	22.063	32.220	30.055	29.634	42.708	38.815	23.173	24.794	- - -	24.471	27.587	34.592	24.095	22.410	24.047
1	HI MI	0.141	0.042	0.132	0.127	0.165	0.032	0.149	0.242	0.219	0.243	0.203	0.102	0.314	0.305	0.252	- - -
		-0.041	0.010	0.026	-0.027	-0.068	-0.109	-0.151	-0.248	-0.283	-0.291	-0.400	-0.583	-0.598	-0.731	-0.767	- - -
		-45.630	79.099	49.910	44.256	46.351	43.985	41.367	31.665	30.695	28.690	26.613	27.911	27.458	27.495	24.648	- - -
2	VO MI	0.194	0.221	- - -	0.207	0.118	0.136	0.076	0.149	0.053	0.148	0.185	0.234	0.250	0.182	0.248	0.258
		0.092	0.024	- - -	0.020	-0.054	-0.088	-0.052	-0.283	-0.361	-0.389	-0.460	-0.678	-0.780	-0.908	-0.944	-1.138
		30.473	33.477	- - -	35.783	42.673	47.043	37.333	25.318	23.184	24.694	21.935	25.435	23.837	24.768	24.506	24.009
2	HI MI	0.051	0.036	0.041	0.047	0.053	-0.034	0.117	0.129	0.003	0.142	0.085	0.014	0.120	0.082	0.184	- - -
		-0.008	0.019	0.018	-0.020	-0.096	-0.166	-0.110	-0.309	-0.345	-0.393	-0.556	-0.710	-0.680	-0.738	-0.857	- - -
		-12.627	60.482	1.245	58.859	55.436	44.132	41.328	34.829	30.760	31.263	29.457	30.442	26.665	25.768	26.758	- - -
3	VO MI	0.119	0.104	0.072	0.063	0.067	0.071	0.096	0.004	-0.070	0.086	0.148	0.128	0.160	0.156	0.119	0.170
		0.076	0.066	0.066	0.020	-0.008	-0.060	-0.064	-0.231	-0.279	-0.269	-0.330	-0.362	-0.475	-0.516	-0.602	-0.703
		-36.204	1.506	54.218	3.316	7.294	32.203	41.037	46.097	39.345	41.527	43.077	40.057	37.665	37.051	38.377	35.679
3	HI CB	0.087	0.011	0.167	0.080	0.098	0.033	0.146	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
		0.024	-0.020	-0.129	-0.143	-0.135	-0.267	-0.199	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
		76.517	49.581	56.981	32.351	47.843	38.260	41.076	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
4	VO MI	0.173	0.181	0.231	0.224	0.259	0.225	0.218	0.174	0.247	0.308	0.439	0.528	0.446	0.468	0.515	0.472
		0.110	0.066	-0.004	-0.049	-0.109	-0.175	-0.184	-0.131	-0.213	-0.154	-0.249	-0.333	-0.422	-0.432	-0.495	-0.494
		-25.742	42.268	50.032	40.905	44.689	49.613	43.292	28.649	39.491	34.330	37.153	38.458	35.302	36.065	34.795	34.694
4	HI CB	0.177	0.218	0.209	0.131	0.228	0.122	0.251	0.302	0.319	0.495	0.417	0.368	0.495	0.526	0.813	1.034
		0.084	-0.000	-0.007	-0.018	-0.167	-0.188	-0.213	-0.168	-0.247	-0.216	-0.306	-0.427	-0.452	-0.429	-0.452	-0.515
		45.924	47.360	47.645	53.850	48.122	44.815	40.917	43.782	41.550	42.862	39.298	40.263	38.444	38.498	39.372	40.673
5	VO MI	0.148	0.184	0.220	0.202	0.222	0.216	0.284	0.284	0.313	0.376	0.306	0.252	0.314	0.315	0.623	0.933
		0.045	0.016	-0.030	-0.075	-0.109	-0.200	-0.189	-0.252	-0.347	-0.306	-0.288	-0.338	-0.479	-0.494	-0.560	-0.631
		45.834	33.088	41.324	34.541	38.255	45.926	42.754	39.618	38.971	38.553	38.589	34.892	31.442	32.145	45.992	48.965
5	HI MI	0.238	0.302	0.221	0.250	0.240	0.154	0.305	0.542	0.506	0.632	0.652	0.531	0.624	0.726	1.609	1.959
		-0.109	-0.050	-0.047	-0.112	-0.204	-0.213	-0.259	-0.257	-0.284	-0.283	-0.442	-0.619	-0.547	-0.600	-0.725	-0.774
		22.734	35.008	39.848	38.289	37.010	41.156	39.684	41.584	39.530	41.449	39.201	37.565	36.076	34.990	39.966	38.457
6	VO UN	0.182	0.238	0.248	0.259	0.273	0.302	0.223	1.782	1.830	1.980	2.096	2.113	1.957	2.008	2.190	2.261
		0.040	0.029	0.004	-0.005	-0.053	-0.130	-0.121	-0.367	-0.436	-0.418	-0.452	-0.474	-0.537	-0.559	-0.652	-0.680
		4.465	20.167	25.157	29.481	36.228	42.607	36.363	46.747	46.924	46.985	46.349	44.679	42.654	42.843	41.605	41.257
6	HI MI	0.161	0.129	0.146	0.141	0.070	0.056	0.101	0.326	0.284	0.461	0.543	0.458	0.610	0.705	0.724	0.792
		-0.074	-0.036	-0.019	-0.025	-0.000	-0.070	-0.133	-0.197	-0.207	-0.227	-0.371	-0.496	-0.458	-0.476	-0.532	-0.552
		-35.395	-28.685	-4.703	17.131	-10.751	10.225	23.715	21.414	20.851	25.033	23.387	23.689	23.676	21.951	24.244	22.138

Anlage A 6.6

VERSUCHSBALKEN B2

\*\*\*\*\*

LAENGSSTAHLDEHNUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.000 0.125 0.250 0.375 0.406 0.469 0.500 0.531 0.563 0.594 0.625 0.656 0.688

1

Spann-	1	1.427	1.448	1.474	1.506	1.520	1.540	1.571	1.610	1.648	1.730	1.787	1.857	1.941
stahl	2	1.420	1.440	1.466	1.499	1.511	1.533	1.564	1.603	1.639	1.721	1.777	1.844	1.928
	3	1.430	1.450	1.478	1.508	1.521	1.564	1.596	1.635	1.669	1.760	1.818	1.889	1.965
	4	1.433	1.460	1.490	1.529	1.541	1.568	1.602	1.646	1.694	1.782	1.843	1.914	2.004
	5	1.463	1.491	1.521	1.559	1.573	1.599	1.634	1.679	1.734	1.826	1.888	1.962	2.053
	6	1.521	1.547	1.579	1.618	1.631	1.658	1.693	1.738	1.791	1.883	1.944	2.019	2.109
	7	1.470	1.497	1.529	1.566	1.580	1.629	1.664	1.709	1.755	1.855	1.915	1.991	2.073
	8	1.457	1.485	1.517	1.554	1.568	1.618	1.653	1.698	1.746	1.846	1.907	1.983	2.066
	9	1.467	1.498	1.529	1.568	1.581	1.607	1.640	1.685	1.735	1.820	1.881	1.954	2.045
	10	1.360	1.391	1.423	1.461	1.475	1.525	1.557	1.598	1.621	1.713	1.772	1.842	1.921
Beton-	2	-0.355	-0.349	-0.340	-0.326	-0.322	-0.306	-0.307	-0.302	-0.365	-0.380	-0.380	-0.392	-0.400
stahl	3	-0.361	-0.332	-0.298	-0.244	-0.223	-0.183	-0.171	-0.163	-0.217	-0.222	-0.218	-0.221	-0.224
	4	-0.324	-0.284	-0.233	-0.168	-0.139	-0.093	-0.075	-0.053	-0.073	-0.074	-0.065	-0.066	-0.066
	5	-0.340	-0.293	-0.239	-0.173	-0.140	-0.091	-0.072	-0.053	-0.081	-0.079	-0.068	-0.063	-0.062
	6	-0.342	-0.296	-0.242	-0.174	-0.141	-0.088	-0.068	-0.049	-0.081	-0.079	-0.069	-0.065	-0.065
	7	-0.391	-0.341	-0.284	-0.215	-0.184	-0.137	-0.119	-0.100	-0.120	-0.117	-0.108	-0.105	-0.106
	8	-0.372	-0.298	-0.210	-0.107	-0.072	-0.007	0.025	0.080	0.621	0.740	0.934	1.217	1.347
	9	-0.362	-0.271	-0.167	-0.044	-0.012	0.399	1.430	2.212	3.463	4.001	5.567	-	-
	10	-0.398	-0.317	-0.227	-0.122	-0.088	-0.005	0.025	0.112	0.938	0.968	1.119	1.251	1.362
	11	-0.350	-0.311	-0.260	-0.195	-0.170	-0.124	-0.111	-0.091	-0.100	-0.100	-0.089	-0.085	-0.083
	12	-0.388	-0.338	-0.280	-0.206	-0.175	-0.113	-0.098	-0.076	-0.102	-0.100	-0.090	-0.086	-0.085
	13	-0.394	-0.341	-0.283	-0.210	-0.180	-0.122	-0.102	-0.080	-0.108	-0.105	-0.096	-0.092	-0.093
	14	-0.418	-0.356	-0.291	-0.209	-0.180	-0.128	-0.112	-0.096	-0.108	-0.104	-0.095	-0.093	-0.093
	15	-0.365	-0.339	-0.305	-0.259	-0.248	-0.207	-0.196	-0.184	-0.221	-0.226	-0.221	-0.223	-0.230
	16	-0.356	-0.350	-0.340	-0.328	-0.321	-0.299	-0.291	-0.293	-0.350	-0.360	-0.362	-0.370	-0.383

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.719 0.750 0.781 0.813 0.844 0.875 0.906 0.938 0.955 0.969 0.979 1.000

Spann-	1	2.630	2.664	2.703	2.752	2.798	2.850	2.895	2.954	3.002	3.038	3.086	3.165
stahl	2	2.614	2.647	2.685	2.733	2.778	2.828	2.871	2.929	2.975	3.011	3.055	3.130
	3	2.634	2.668	2.711	2.758	2.808	2.860	2.903	2.963	3.013	3.049	3.095	3.172
	4	2.600	2.637	2.679	2.733	2.781	2.837	2.885	2.951	3.005	3.043	3.095	3.178
	5	2.644	2.681	2.726	2.780	2.832	2.889	2.940	3.007	3.060	3.101	3.153	3.239
	6	2.719	2.757	2.801	2.856	2.907	2.964	3.015	3.083	3.137	3.178	3.230	3.316
	7	2.655	2.691	2.740	2.791	2.845	2.900	2.950	3.017	3.070	3.109	3.162	3.245
	8	2.660	2.698	2.746	2.798	2.853	2.909	2.959	3.025	3.081	3.120	3.174	3.258
	9	2.687	2.724	2.769	2.822	2.872	2.929	2.975	3.040	3.092	3.130	3.179	3.260
	10	2.548	2.587	2.635	2.686	2.737	2.792	2.836	2.901	2.956	2.994	3.041	3.122
Beton-	2	-0.539	-0.544	-0.555	-0.557	-0.567	-0.567	-0.580	-0.592	-0.601	-0.608	-0.629	-0.653
stahl	3	-0.339	-0.332	-0.329	-0.322	-0.311	-0.319	-0.319	-0.319	-0.323	-0.340	-0.340	-0.363
	4	-0.162	-0.153	-0.145	-0.136	-0.128	-0.116	-0.109	-0.100	-0.097	-0.097	-0.100	-0.104
	5	-0.168	-0.157	-0.146	-0.135	-0.126	-0.112	-0.105	-0.099	-0.100	-0.101	-0.109	-0.116
	6	-0.164	-0.153	-0.142	-0.131	-0.121	-0.107	-0.101	-0.096	-0.096	-0.098	-0.105	-0.112
	7	-0.215	-0.204	-0.194	-0.181	-0.173	-0.159	-0.151	-0.142	-0.142	-0.143	-0.146	-0.149
	8	-0.276	-0.398	0.592	0.804	1.012	1.220	1.421	1.658	1.711	1.724	1.757	1.799
	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	0.172	0.317	0.548	0.787	1.012	1.213	1.362	1.503	1.554	1.568	1.586	1.594
	11	-0.197	-0.189	-0.179	-0.167	-0.160	-0.152	-0.141	-0.134	-0.131	-0.132	-0.133	-0.136
	12	-0.207	-0.196	-0.185	-0.175	-0.165	-0.153	-0.145	-0.140	-0.138	-0.139	-0.141	-0.145
	13	-0.214	-0.204	-0.194	-0.183	-0.173	-0.161	-0.152	-0.145	-0.141	-0.142	-0.146	-0.149
	14	-0.215	-0.207	-0.195	-0.183	-0.174	-0.164	-0.155	-0.149	-0.149	-0.151	-0.154	-0.159
	15	-0.350	-0.346	-0.345	-0.340	-0.339	-0.337	-0.335	-0.337	-0.340	-0.342	-0.349	-0.357
	16	-0.524	-0.531	-0.541	-0.545	-0.553	-0.558	-0.566	-0.577	-0.585	-0.591	-0.604	-0.618

Anlage A6.7

VERSUCHSBALKEN B2

\*\*\*\*\*

DURCHBIEGUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/QU

MESZSTELLE 0.000 0.125 0.250 0.375 0.406 0.469 0.500 0.531 0.563 0.594 0.625 0.656 0.688

1

1	-0.665	0.635	1.170	1.800	1.975	2.425	2.690	2.955	3.660	4.040	4.320	4.665	5.075
2	-1.010	0.335	1.045	1.935	2.255	2.975	3.425	3.950	5.285	5.985	6.510	7.140	7.890
3	-1.090	0.265	1.035	2.005	2.355	3.150	3.665	4.290	5.875	6.720	7.355	8.105	9.005
4	-1.115	0.210	0.985	1.980	2.325	3.145	3.705	4.355	6.065	7.040	7.735	8.570	9.610
5	-1.085	0.060	0.815	1.775	2.110	2.905	3.415	4.025	5.670	6.530	7.160	7.905	8.910
6	-1.000	0.125	0.800	1.670	1.970	2.660	3.070	3.565	4.845	5.535	6.040	6.635	7.365
7	-0.615	0.225	0.690	1.260	1.415	1.790	2.010	2.265	2.905	3.280	3.545	3.835	4.175

BELASTUNGSGRAD Q/QU

MESZSTELLE 0.719 0.750 0.781 0.813 0.844 0.875 0.906 0.938 0.955 0.969 0.979 1.000

1	4.595	4.820	5.150	5.495	5.825	6.165	6.580	7.065	7.440	7.635	8.000	8.395
2	7.045	7.450	8.035	8.670	9.295	9.970	10.780	11.785	12.600	13.015	13.855	14.880
3	8.065	8.555	9.215	9.930	10.650	11.465	12.445	13.705	14.705	15.205	16.240	17.520
4	9.475	9.010	9.760	10.550	11.345	12.205	13.245	14.590	15.675	16.215	17.365	18.815
5	7.820	8.320	9.000	9.745	10.475	11.280	12.265	13.300	14.465	14.950	15.970	17.195
6	6.490	6.890	7.440	8.050	8.645	9.295	10.070	11.055	11.825	12.215	13.025	14.020
7	3.715	3.925	4.180	4.495	4.785	5.105	5.480	5.945	6.310	6.500	6.870	7.345

BUEGELDEHNUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.000 0.125 0.250 0.375 0.406 0.469 0.500 0.531 0.563 0.594 0.625 0.656 0.688

1

1	0.012	0.012	0.011	0.365	0.378	0.413	0.436	0.456	0.486	0.510	0.537	0.565	0.605
2	0.029	0.033	0.036	0.039	0.109	0.270	0.567	0.733	0.915	0.965	1.019	1.071	1.142
3	0.016	0.021	0.027	0.373	0.414	0.473	0.521	0.605	0.769	0.806	0.843	0.878	0.932
4	0.012	0.012	0.012	0.069	0.085	0.213	0.643	0.684	0.764	0.804	0.841	0.883	0.933
5	0.042	0.032	0.022	0.020	0.043	0.113	0.132	0.420	0.660	0.698	0.735	0.775	0.834
6	0.019	0.018	0.019	0.040	0.699	0.966	1.008	0.999	1.149	1.210	1.270	1.333	1.406
7	0.010	0.006	0.000	0.021	0.066	0.117	0.180	0.517	0.643	0.677	0.713	0.760	0.808
8	0.033	0.027	0.022	0.022	0.024	0.026	0.024	0.026	0.067	0.065	0.069	0.073	0.081
9	0.021	0.023	0.026	0.052	0.060	0.084	0.095	0.298	0.419	0.428	0.443	0.450	0.464
10	0.012	0.012	0.007	0.023	0.160	0.318	0.380	0.450	0.572	0.605	0.654	0.709	0.773
11	0.029	0.026	0.023	0.051	0.060	0.069	0.116	0.205	0.602	0.598	0.615	0.617	0.572
12	0.020	0.018	0.018	0.060	0.099	0.280	0.514	0.590	0.694	0.715	0.752	0.785	0.804
13	0.006	0.019	0.031	0.233	0.268	0.380	0.430	0.512	1.296	1.325	1.353	1.385	1.423
14	0.026	0.028	0.032	0.076	0.370	0.500	0.537	0.566	0.622	0.654	0.687	0.717	0.759
15	0.013	0.024	0.036	0.071	0.090	0.520	0.573	0.646	0.750	0.788	0.831	0.876	0.930
16	0.010	0.019	0.031	0.350	0.382	0.479	0.516	0.568	0.669	0.701	0.730	0.758	0.793
17	0.039	0.046	0.054	0.229	0.351	0.475	0.537	0.579	0.700	0.738	0.775	0.811	0.856
18	0.017	0.024	0.035	0.103	0.139	0.196	0.242	0.374	0.525	0.556	0.586	0.618	0.662

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.719 0.750 0.781 0.813 0.844 0.875 0.906 0.938 0.955 0.969 0.979 1.000

1	0.691	0.737	0.811	0.881	0.935	0.996	1.062	1.148	1.211	1.240	1.313	1.453
2	1.252	1.313	1.407	1.505	1.593	1.700	1.828	1.998	2.127	2.182	2.327	2.521
3	1.045	1.085	1.159	1.242	1.311	1.395	1.499	1.640	1.760	1.804	1.964	2.214
4	0.996	1.034	1.087	1.139	1.195	1.263	1.368	1.527	1.662	1.728	1.914	2.151
5	0.996	1.047	1.190	1.283	1.359	1.438	1.521	1.605	1.650	1.670	1.704	1.743
6	1.486	1.543	1.617	1.688	1.753	1.820	1.886	1.957	1.999	2.035	2.060	2.005
7	0.357	0.907	0.974	1.049	1.129	1.236	1.381	1.565	1.744	1.830	2.076	2.488
8	0.187	0.199	0.217	0.244	0.272	0.329	0.437	0.599	0.688	0.701	0.748	0.774
9	0.544	0.558	0.577	0.601	0.626	0.664	0.723	0.812	0.929	0.966	1.095	1.280
10	0.839	0.869	0.914	0.963	1.017	1.079	1.152	1.231	1.281	1.300	1.340	1.369
11	0.604	0.614	0.634	0.659	0.685	0.717	0.760	0.805	0.835	0.840	0.872	0.889
12	0.802	0.842	0.889	0.932	0.979	1.028	1.090	1.155	1.197	1.214	1.249	1.273
13	1.506	1.541	1.610	1.691	1.789	1.905	1.924	1.754	1.709	1.691	1.708	1.751
14	0.820	0.852	0.898	0.942	0.992	1.050	1.117	1.198	1.257	1.281	1.337	1.386
15	0.996	1.034	1.095	1.153	1.215	1.281	1.362	1.461	1.535	1.567	1.639	1.705
16	0.837	0.870	0.921	0.969	1.015	1.062	1.116	1.177	1.219	1.238	1.276	1.311
17	0.916	0.951	1.009	1.067	1.123	1.184	1.256	1.337	1.387	1.409	1.450	1.488
18	0.743	0.778	0.842	0.902	0.957	1.018	1.089	1.177	1.238	1.262	1.317	1.367

VERSUCHSBALKEN B2

\*\*\*\*\*

ERMITTELTE BETONLAENGSDEHNUNG IN PROMILLE

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/QU

MESZSTELLE 0.000 0.125 0.188 0.250 0.375 0.438 0.469 0.500 0.531 0.531 0.594 0.625 0.656

II/6	-0.132	-0.209	-0.170	-0.141	-0.286	-0.313	-0.463	-0.458	-0.499	-0.583	-0.633	-0.655	-0.737
III/9	-0.093	-0.168	-0.159	-0.152	-0.211	-0.279	-0.315	-0.383	-0.045	0.118	0.170	0.204	0.224
IV/12	-0.138	-0.127	-0.154	-0.175	-0.161	0.193	0.179	0.195	0.302	0.390	0.497	0.533	0.603
V/15	-0.175	-0.150	-0.190	-0.170	-0.259	-0.234	-0.283	-0.345	-0.286	-0.193	-0.175	-0.234	-0.234
I/3	-0.113	-0.197	-0.141	-0.116	-0.168	-0.245	-0.363	-0.317	-0.109	-0.007	-0.007	0.025	0.002
VI/18	-0.254	-0.234	-0.204	-0.170	-0.293	-0.297	-0.324	-0.351	-0.345	-0.463	-0.517	-0.512	-0.535
VII/37	0.048	0.002	-0.059	-0.057	-0.247	-0.281	-0.333	-0.324	-0.349	-0.438	-0.449	-0.458	-0.526
VIII/38	0.127	0.054	-0.018	-0.039	-0.175	-0.288	-0.333	-0.372	-0.463	-0.544	-0.673	-0.703	-0.787
IX/39	0.122	-0.050	-0.125	-0.079	-0.281	-0.408	-0.499	-0.599	-0.676	-0.927	-1.102	-1.254	-1.406
X/40	0.120	0.009	-0.077	-0.034	-0.231	-0.306	-0.306	-0.410	-0.567	-0.737	-0.959	-0.984	-1.145
XI/41	0.109	0.007	-0.102	-0.048	-0.252	-0.351	-0.395	-0.442	-0.528	-0.621	-0.741	-0.785	-0.844
XII/42	0.077	-0.029	-0.091	-0.070	-0.213	-0.320	-0.333	-0.361	-0.401	-0.442	-0.501	-0.537	-0.605
III/30	-0.079	-0.086	-0.168	-0.116	-0.238	-0.222	-0.231	-0.295	-0.338	-0.397	-0.424	-0.490	-0.524
IV/27	-0.127	-0.113	-0.129	-0.138	-0.270	-0.190	-0.265	-0.238	-0.263	-0.349	-0.390	-0.454	-0.485
I/36	-0.075	-0.082	-0.116	-0.061	0.744	0.937	0.896	0.821	0.898	0.912	0.982	1.014	1.063
II/33	-0.061	-0.052	-0.154	-0.116	-0.181	-0.161	-0.193	-0.215	-0.231	-0.238	-0.259	-0.308	-0.351
V/24	-0.152	-0.125	-0.156	-0.190	-0.231	-0.272	-0.317	-0.243	-0.234	-0.247	-0.252	-0.295	-0.277
VI/21	-0.118	-0.054	-0.070	-0.066	-0.150	-0.141	-0.193	-0.154	-0.163	-0.193	-0.197	-0.229	-0.202

BELASTUNGSGRAD Q/CU

MESZSTELLE 0.688 0.719 0.719 0.750 0.781 0.813 0.844 0.875 0.906 0.938

II/6	-0.789	-0.866	-0.916	-0.905	-1.023	-1.029	-	-	-	-	-	-	-
III/9	0.469	0.517	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IV/12	0.735	0.848	0.653	0.719	0.769	0.837	-	-	-	-	-	-	-
V/15	-0.274	-0.254	-0.249	-0.277	-0.295	-0.288	-	-	-	-	-	-	-
I/3	-0.018	0.000	-0.163	-0.111	-0.100	-0.154	-	-	-	-	-	-	-
VI/18	-0.590	-0.567	-0.662	-0.653	-0.757	-0.771	-	-	-	-	-	-	-
VII/37	-0.567	-0.565	-0.508	-0.549	-0.633	-0.689	-0.678	-0.726	-0.771	-0.830	-	-	-
VIII/38	-0.844	-0.884	-0.789	-0.839	-0.930	-0.977	-1.016	-1.084	-1.175	-1.243	-	-	-
IX/39	-1.544	-1.726	-1.533	-1.596	-1.707	-1.864	-2.016	-2.193	-2.354	-2.678	-	-	-
X/40	-1.311	-1.347	-1.202	-1.295	-1.460	-1.501	-1.621	-1.789	-1.925	-2.211	-	-	-
XI/41	-0.959	-0.991	-0.893	-0.948	-1.018	-1.104	-1.202	-1.272	-1.376	-1.528	-	-	-
XII/42	-0.671	-0.694	-0.624	-0.694	-0.764	-0.791	-0.834	-0.887	-0.914	-1.048	-	-	-
III/30	-0.603	-0.583	-0.714	-0.751	-0.798	-0.875	-	-	-	-	-	-	-
IV/27	-0.596	-0.542	-0.624	-0.712	-0.692	-0.751	-	-	-	-	-	-	-
I/36	0.984	1.050	1.048	1.018	0.998	1.050	-	-	-	-	-	-	-
II/33	-0.401	-0.367	-0.474	-0.388	-0.526	-0.524	-	-	-	-	-	-	-
V/24	-0.331	-0.304	-0.365	-0.424	-0.422	-0.463	-	-	-	-	-	-	-
VI/21	-0.306	-0.272	-0.306	-0.351	-0.333	-0.413	-	-	-	-	-	-	-

ERMITTELTE BETONQUERDEHNUNG IN PROMILLE

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/CU

MESZSTELLE 0.000 0.125 0.188 0.250 0.375 0.438 0.469 0.500 0.531 0.531 0.594 0.625 0.656

II/4	0.014	0.002	-0.034	-0.002	-0.063	-0.018	-0.068	0.286	0.433	0.587	0.651	0.698	0.676
III/7	-0.034	-0.034	0.014	-0.009	-0.007	0.129	0.014	0.150	0.483	0.685	0.778	0.846	0.907
IV/10	-0.005	0.018	-0.005	-0.020	0.027	0.503	0.537	0.601	0.653	0.776	0.846	0.850	0.930
V/13	-0.395	-0.377	-0.002	-0.034	-0.063	-0.016	-0.045	0.016	0.145	0.263	0.333	0.338	0.342
I/1	-0.179	0.020	-0.073	-0.036	-0.073	0.009	-0.009	0.098	0.395	0.698	0.703	0.764	0.905
VI/16	0.234	0.272	0.281	0.222	0.274	0.424	0.331	0.465	0.587	0.701	0.771	0.771	0.782
III/28	0.036	0.000	-0.116	0.025	0.107	0.621	0.694	0.755	0.755	0.853	0.889	0.937	1.088
IV/25	0.018	-0.027	-0.054	-0.034	0.068	0.365	0.367	0.422	0.385	0.440	0.524	0.404	0.522
I/34	0.041	-0.023	-0.057	0.005	0.746	0.966	0.973	0.952	0.991	1.141	1.190	1.156	1.268
II/31	0.084	0.084	0.045	0.109	0.177	0.234	0.281	0.667	0.741	0.837	0.375	0.891	0.918
V/22	-0.002	0.082	0.041	0.052	0.075	0.227	0.170	0.261	0.349	0.499	0.472	0.515	0.546
VI/19	-0.048	0.029	0.023	0.011	0.449	0.633	0.619	0.741	0.769	0.821	0.816	0.900	0.921

\*\*\*\*\*  
 ERMITTELTE BETONQUERDEHNUNG IN PROMILLE  
 \*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/QU

MESZSTELLE 0.688 0.719 0.719 0.750 0.781 0.813 0.844 0.875 0.906 0.938

II/4	0.705	0.846	0.875	0.887	0.948	1.057	-	-	-	-	-	-
III/7	1.002	1.107	1.156	1.177	1.274	1.368	-	-	-	-	-	-
IV/10	0.966	1.075	1.086	1.109	1.156	1.202	-	-	-	-	-	-
V/13	0.385	0.488	0.440	0.454	0.508	0.551	-	-	-	-	-	-
I/1	0.814	1.025	1.020	1.129	1.206	1.290	-	-	-	-	-	-
VI/16	0.914	0.959	0.998	0.907	1.070	1.104	-	-	-	-	-	-
III/28	1.170	1.327	1.372	1.449	1.526	1.667	-	-	-	-	-	-
IV/25	0.474	0.549	-	-	0.995	-	-	-	-	-	-	-
I/34	1.302	1.404	1.451	1.463	1.456	1.551	-	-	-	-	-	-
II/31	0.882	1.009	0.943	0.959	0.907	1.059	-	-	-	-	-	-
V/22	0.533	0.621	0.576	0.587	0.642	0.689	-	-	-	-	-	-
VI/19	0.884	0.939	0.930	0.884	0.989	1.043	-	-	-	-	-	-

\*\*\*\*\*  
 ERMITTELTE BETONTRAJEKTORIENDEHNUNG IN PROMILLE  
 \*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/QU

MESZSTELLE 0.000 0.125 0.188 0.250 0.375 0.438 0.469 0.500 0.531 0.531 0.594 0.625 0.656

II/5	0.059	-0.138	-0.138	-0.070	-0.186	-0.383	-0.395	-0.295	-0.451	-0.601	-0.574	-0.798	-0.730
III/8	-0.057	-0.129	-0.138	-0.163	-0.261	-0.410	-0.435	-0.447	-0.596	-0.791	-0.837	-0.927	-0.973
IV/11	-0.102	-0.093	-0.143	-0.206	-0.265	-0.447	-0.524	-0.569	-0.646	-0.810	-0.923	-0.977	-1.023
V/14	-0.082	-0.213	-0.154	-0.281	-0.397	-0.397	-0.483	-0.540	-0.585	-0.626	-0.751	-0.807	-0.732
I/2	-0.059	-0.166	-0.172	-0.215	-0.317	-0.429	-0.488	-0.501	-0.644	-0.682	-0.932	-0.916	-0.982
II/54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.426	-0.580	-0.583	-0.728
III/53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.014	0.079	0.014	0.073
IV/52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.091	0.082	0.068	-0.002
V/51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.206	-0.297	-0.308	-0.444
VI/17	-0.073	-0.168	-0.125	-0.186	-0.277	-0.356	-0.397	-0.392	-0.503	-0.619	-0.646	-0.728	-0.853
III/29	0.048	-0.032	-0.202	-0.143	-0.263	-0.454	-0.483	-0.524	-0.692	-0.939	-1.134	-1.159	-1.245
IV/26	-0.014	-0.100	-0.134	-0.154	-0.333	-0.590	-0.630	-0.728	-0.825	-1.009	-1.102	-1.118	-1.120
VI/44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.347	-0.431	-0.637	-0.669
I/35	-0.009	-0.034	-0.129	-0.111	-0.222	-0.170	-0.231	-0.274	-0.238	-0.385	-0.454	-0.469	-0.499
II/32	0.016	-0.011	-0.118	-0.184	-0.211	-0.293	-0.340	-0.395	-0.351	-0.540	-0.576	-0.646	-0.662
III/48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.254	-0.274	-0.313	-0.351
IV/45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.141	-0.163	-0.159	-0.238
V/23	-0.088	-0.091	-0.147	-0.163	-0.317	-0.315	-0.381	-0.401	-0.456	-0.567	-0.664	-0.701	-0.728
VI/20	-0.215	-0.184	-0.197	-0.186	-0.356	-0.340	-0.372	-0.333	-0.415	-0.528	-0.519	-0.522	-0.785
I/50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.245	-0.306	-0.313	-0.383
II/49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.281	-0.410	-0.460	-0.472
III/47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.227	-0.045	-0.213	-0.095
IV/46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.011	0.048	-0.027	0.501
VI/43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.227	-0.351	-0.374	-0.399

\*\*\*\*\*  
 ERMITTELTE BETONTRAJEKTORIENDEHNUNG IN PROMILLE  
 \*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/QU

MESZSTELLE 0.688 0.719 0.719 0.750 0.781 0.813 0.844 0.875 0.906 0.938

II/5	-0.882	-0.844	-0.900	-0.980	-0.998	-1.190	-1.236	-1.390	-1.707	-1.669	-	-	-
III/8	-1.000	-1.059	-1.086	-1.150	-1.224	-1.283	-1.367	-1.469	-1.610	-1.660	-	-	-
IV/11	-1.095	-1.186	-1.281	-1.324	-1.361	-1.506	-1.605	-1.726	-1.941	-2.104	-	-	-
V/14	-0.859	-0.900	-0.939	-0.984	-1.057	-1.111	-	-1.293	-1.399	-1.503	-	-	-
I/2	-1.091	-1.156	-1.175	-1.259	-1.345	-1.410	-	-1.633	-1.771	-1.966	-	-	-
II/54	-0.739	-0.825	-0.948	-0.943	-1.104	-1.186	-	-1.426	-1.517	-1.676	-	-	-
III/53	0.029	0.041	0.052	0.029	0.005	0.014	0.025	0.057	-	0.048	-	-	-
IV/52	-0.052	-0.005	-	-0.014	-0.063	-0.066	-0.102	-0.077	-0.095	-0.116	-	-	-
V/51	-0.490	-0.508	-0.537	-0.735	-0.698	-0.762	-0.853	-0.871	-1.120	-1.136	-	-	-
VI/17	-0.787	-0.614	-0.918	-0.975	-1.048	-1.093	-	-1.195	-1.279	-1.463	-	-	-
III/29	-1.417	-1.506	-1.585	-1.680	-1.829	-1.959	-2.127	-2.372	-2.590	-3.068	-	-	-
IV/26	-1.263	-1.311	-1.361	-1.410	-1.549	-1.610	-1.746	-1.914	-2.118	-2.379	-	-	-
VI/44	-0.816	-0.782	-0.828	-0.912	-0.995	-1.111	-1.063	-1.118	-1.218	-1.422	-	-	-
I/35	-0.569	-0.560	-0.549	-0.660	-0.710	-0.741	-	-	-	-	-	-	-
II/32	-0.771	-0.814	-0.884	-0.882	-	-1.059	-1.048	-1.204	-1.224	-1.406	-	-	-
III/48	-0.406	-0.431	-0.503	-0.546	-0.664	-0.707	-	-0.832	-0.880	-0.948	-	-	-
IV/45	-0.324	-0.345	-0.336	-0.408	-0.454	-0.438	-0.585	-0.696	-0.739	-0.932	-	-	-
V/23	-0.825	-0.871	-0.921	-0.998	-1.029	-1.125	-1.215	-1.347	-1.438	-1.649	-	-	-
VI/20	-0.766	-0.669	-0.723	-0.810	-0.825	-0.884	-0.912	-1.288	-1.172	-1.293	-	-	-
I/50	-0.485	-0.454	-0.585	-0.635	-0.696	-0.753	-0.771	-0.909	-0.952	-1.075	-	-	-
II/49	-0.646	-0.587	-0.671	-0.791	-0.891	-0.943	-	-1.175	-1.256	-1.481	-	-	-
III/47	-0.029	0.016	-0.574	-0.671	-0.712	-0.490	-0.537	-0.546	-0.569	-0.630	-	-	-
IV/46	0.186	0.256	0.062	0.088	-0.027	-	-0.147	-0.129	-0.073	-0.102	-	-	-
VI/43	-0.460	-0.454	-0.567	-0.637	-0.819	-0.571	-0.880	-1.036	-1.152	-1.229	-	-	-

VERSUCHSBALKEN B2

\*\*\*\*\*

HAUPTDEHNUNGEN DES BETONS  
 \*\*\*\*\*  
 1.ZEILE = EPSILON MAX IN PROMILLE  
 2.ZEILE = EPSILON MIN IN PROMILLE  
 3.ZEILE = WINKEL ZWISCHEN EPSILON MIN UND DER LAENGSSACHSE

		BELASTUNGSGRAD Q/CU													
SCHNITT	LAGE	0.000	0.125	0.188	0.250	0.375	0.438	0.469	0.500	0.531	0.531	0.594	0.625	0.656	
1	VO UN	-0.053	0.045	-0.034	0.069	0.082	0.218	0.164	0.334	0.969	1.623	1.676	1.756	1.958	
		-0.239	-0.222	-0.180	-0.221	-0.323	-0.454	-0.536	-0.553	-0.683	-0.932	-0.980	-0.967	-1.051	
		-55.386	17.769	31.193	36.973	38.205	33.893	29.813	31.038	36.122	36.989	37.249	37.127	36.270	
1	HI MI	0.042	-0.018	-0.035	0.061	1.712	2.073	2.101	2.049	2.128	2.443	2.630	2.641	2.833	
		-0.076	-0.087	-0.138	-0.117	-0.222	-0.170	-0.232	-0.276	-0.239	-0.390	-0.458	-0.471	-0.502	
		-3.927	-16.046	27.617	34.159	44.970	44.630	44.054	43.385	43.874	42.681	43.068	43.692	43.238	
2	VO MI	0.080	0.007	-0.025	-0.002	-0.062	0.097	-0.029	0.341	0.593	0.842	0.876	1.084	0.964	
		-0.198	-0.214	-0.179	-0.141	-0.287	-0.428	-0.502	-0.513	-0.659	-0.838	-0.858	-1.041	-1.025	
		-29.129	9.054	13.949	-0.618	2.944	27.928	16.626	14.664	20.946	22.934	21.121	25.230	22.357	
2	HI MI	0.084	0.089	0.064	0.209	0.273	0.421	0.495	0.988	1.032	1.296	1.358	1.404	1.422	
		-0.061	-0.057	-0.173	-0.216	-0.277	-0.348	-0.407	-0.536	-0.522	-0.697	-0.742	-0.821	-0.855	
		-1.776	10.828	16.273	29.033	24.711	29.531	29.159	27.310	25.636	28.685	29.662	28.701	28.068	
3	VO MI	-0.033	-0.028	0.036	0.029	0.074	0.317	0.178	0.308	1.076	1.627	1.820	2.012	2.141	
		-0.094	-0.174	-0.181	-0.190	-0.292	-0.467	-0.479	-0.541	-0.638	-0.824	-0.872	-0.962	-1.010	
		-6.213	11.340	18.567	24.543	28.068	29.330	29.982	25.559	36.026	38.313	38.472	38.767	38.742	
3	HI OB	0.069	0.001	-0.077	0.075	0.197	0.977	1.083	1.149	1.262	1.552	1.749	1.779	2.009	
		-0.112	-0.087	-0.207	-0.166	-0.328	-0.578	-0.620	-0.689	-0.845	-1.096	-1.284	-1.332	-1.445	
		-25.199	-7.175	33.286	27.065	24.433	28.589	28.542	27.576	29.374	30.914	32.170	31.351	31.087	
4	VO MI	0.002	0.028	0.018	0.036	0.152	1.158	1.258	1.386	1.615	1.989	2.276	2.368	2.563	
		-0.145	-0.137	-0.177	-0.231	-0.286	-0.462	-0.542	-0.590	-0.660	-0.823	-0.933	-0.985	-1.030	
		12.319	13.985	20.221	27.231	32.302	39.484	39.264	39.072	40.561	41.056	41.677	42.287	42.390	
4	HI OB	0.029	-0.018	-0.035	-0.000	0.186	0.820	0.802	0.976	1.004	1.171	1.322	1.149	1.263	
		-0.138	-0.122	-0.148	-0.172	-0.388	-0.645	-0.700	-0.792	-0.882	-1.080	-1.188	-1.199	-1.226	
		-14.594	17.451	24.288	26.297	26.964	33.863	32.554	34.039	34.957	34.744	34.324	34.285	33.071	
5	VO MI	-0.069	-0.008	0.014	0.089	0.095	0.168	0.176	0.252	0.487	0.734	0.947	0.957	0.891	
		-0.201	-0.219	-0.206	-0.293	-0.417	-0.418	-0.504	-0.581	-0.628	-0.664	-0.789	-0.853	-0.783	
		-26.479	34.928	15.838	34.599	33.725	34.081	34.771	32.163	33.637	35.485	36.492	35.793	34.938	
5	HI MI	-0.001	0.103	0.076	0.084	0.206	0.362	0.319	0.490	0.648	0.913	0.964	1.017	1.090	
		-0.153	-0.146	-0.191	-0.222	-0.362	-0.407	-0.466	-0.472	-0.533	-0.661	-0.744	-0.797	-0.821	
		4.172	16.941	21.130	18.921	28.687	24.768	25.813	29.212	30.209	30.855	32.467	31.732	32.247	
6	VO UN	0.242	0.334	0.331	0.315	0.380	0.617	0.521	0.664	0.900	1.059	1.133	1.200	1.301	
		-0.262	-0.296	-0.254	-0.263	-0.399	-0.490	-0.514	-0.550	-0.658	-0.821	-0.879	-0.941	-1.054	
		7.239	18.235	16.994	23.623	21.668	24.663	25.363	23.869	26.624	25.870	25.101	26.600	28.003	
6	HI MI	0.054	0.164	0.156	0.136	0.737	0.948	0.925	1.063	1.159	1.297	1.281	1.362	1.634	
		-0.220	-0.189	-0.203	-0.191	-0.438	-0.456	-0.499	-0.476	-0.553	-0.669	-0.662	-0.691	-0.915	
		37.575	38.198	37.498	38.174	29.677	28.279	27.619	27.231	28.508	29.473	29.280	28.321	31.934	

Anlage A6.11

VERSUCHSBALKEN B2

HAUPTDEHNUNGEN DES BETONS

1. ZEILE = EPSILON MAX IN PROMILLE  
 2. ZEILE = EPSILON MIN IN PROMILLE  
 3. ZEILE = WINKEL ZWISCHEN EPSILON MIN UND DER LÄNGSACHSE

BELASTUNGSGRAD Q/QU

SCHNITT      LAGE      0.688   0.719   0.719   0.750   0.781   0.813   0.844   0.875   0.906   0.938

		1.944	2.258	2.138	2.383	2.560	2.674	-	-	-	-	-	-
1	VO UN	-1.148	-1.233	-1.291	-1.365	-1.454	-1.538	-	-	-	-	-	-
		37.195	36.462	34.876	35.338	35.507	34.974	-	-	-	-	-	-
		2.862	3.023	3.059	3.154	3.177	3.357	-	-	-	-	-	-
1	HI MI	-0.576	-0.569	-0.560	-0.673	-0.723	-0.756	-	-	-	-	-	-
		42.347	42.172	41.804	41.661	41.629	41.502	-	-	-	-	-	-
		1.032	1.185	1.235	1.312	1.339	1.607	-	-	-	-	-	-
2	VO MI	-1.166	-1.205	-1.276	-1.330	-1.414	-1.579	-	-	-	-	-	-
		24.177	22.127	22.242	23.650	22.132	24.549	-	-	-	-	-	-
		1.438	1.648	1.559	1.633	-	1.812	-	-	-	-	-	-
2	HI MI	-0.957	-1.006	-1.090	-1.062	-	-1.277	-	-	-	-	-	-
		28.808	29.389	28.824	30.010	-	29.588	-	-	-	-	-	-
		2.491	2.706	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	VO MI	-1.020	-1.082	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		40.635	40.520	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2.201	2.479	2.509	2.657	2.655	3.072	-	-	-	-	-	-
3	HI CB	-1.634	-1.735	-1.851	-1.959	-2.127	-2.280	-	-	-	-	-	-
		31.233	31.523	30.706	30.768	31.095	30.822	-	-	-	-	-	-
		2.799	3.112	3.031	3.160	3.294	3.552	-	-	-	-	-	-
4	VO MI	-1.098	-1.139	-1.292	-1.332	-1.369	-1.513	-	-	-	-	-	-
		43.301	43.487	42.126	42.510	42.620	42.933	-	-	-	-	-	-
		1.255	1.427	-	-	2.050	-	-	-	-	-	-	-
4	HI CB	-1.377	-1.420	-	-	-1.747	-	-	-	-	-	-	-
		33.003	33.731	-	-	31.809	-	-	-	-	-	-	-
		1.028	1.200	1.186	1.222	1.337	1.443	-	-	-	-	-	-
5	VO MI	-0.917	-0.966	-0.995	-1.045	-1.124	-1.180	-	-	-	-	-	-
		35.093	34.979	35.791	35.591	35.481	35.672	-	-	-	-	-	-
		1.123	1.287	1.235	1.273	1.367	1.478	-	-	-	-	-	-
5	HI MI	-0.921	-0.970	-1.024	-1.110	-1.147	-1.252	-	-	-	-	-	-
		32.495	32.904	32.688	32.454	32.482	32.524	-	-	-	-	-	-
		1.373	1.462	1.535	1.477	1.668	1.737	-	-	-	-	-	-
6	VO UN	-1.049	-1.070	-1.199	-1.223	-1.355	-1.404	-	-	-	-	-	-
		25.803	26.465	26.305	27.354	26.412	26.869	-	-	-	-	-	-
		1.500	1.505	1.517	1.508	1.657	1.718	-	-	-	-	-	-
6	HI MI	-0.922	-0.838	-0.893	-0.975	-1.001	-1.088	-	-	-	-	-	-
		30.289	29.434	29.579	30.080	30.087	29.367	-	-	-	-	-	-

Anlage A6.12



VERSUCHSBALKEN B3

\*\*\*\*\*

DURCHBIEGUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.000 0.111 0.222 0.222 0.333 0.444 0.481 0.519 0.556 0.593 0.630 0.667 0.704

1	-1.485	-0.265	0.290	-0.915	-0.540	-0.080	0.075	0.225	0.410	0.615	0.975	1.480	2.125
2	-2.445	-1.060	-0.225	-2.055	-1.440	-0.690	-0.420	-0.155	0.185	0.580	1.360	2.400	3.790
3	-2.555	-1.180	-0.290	-2.175	-1.515	-0.705	-0.415	-0.125	0.260	0.700	1.635	2.860	4.515
4	-2.585	-1.230	-0.330	-2.245	-1.555	-0.730	-0.430	-0.130	0.270	0.780	1.845	3.255	5.155
5	-2.515	-1.235	-0.375	-2.240	-1.575	-0.785	-0.500	-0.210	0.160	0.595	1.510	2.695	4.295
6	-2.385	-1.205	-0.415	-2.190	-1.595	-0.880	-0.620	-0.385	-0.035	0.325	1.080	2.080	3.425
7	-1.475	-0.660	-0.175	-1.290	-0.950	-0.540	-0.395	-0.255	-0.080	0.105	0.460	0.950	1.585

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.704 0.741 0.741 0.778 0.815 0.852 0.889 0.926 0.963 0.963

1	2.620	3.125	0.970	1.100	1.290	1.585	2.040	2.540	3.145	3.260			
2	4.990	6.045	1.970	2.140	2.575	3.225	4.220	5.285	6.615	7.095			
3	5.975	7.230	2.510	2.735	3.250	4.030	5.220	6.515	8.115	8.755			
4	6.840	8.290	2.960	3.175	3.745	4.640	6.020	7.510	9.385	10.205			
5	5.735	6.960	2.375	2.585	3.085	3.850	5.010	6.255	7.820	8.460			
6	4.585	5.620	1.640	1.840	2.290	2.955	3.955	4.950	6.250	6.815			
7	2.080	2.565	0.505	0.600	0.800	1.090	1.525	2.010	2.520	2.795			

LAENGSSTAHLDEHNUNGEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.000 0.111 0.222 0.222 0.333 0.444 0.481 0.519 0.556 0.593 0.630 0.667 0.704

1	0.046	0.047	0.049	0.101	0.101	0.103	0.104	0.105	0.105	0.106	0.109	0.113	0.119
2	0.043	0.044	0.046	0.098	0.099	0.101	0.101	0.102	0.103	0.104	0.107	0.111	0.117
3	0.044	0.045	0.047	0.098	0.098	0.100	0.101	0.101	0.102	0.103	0.106	0.110	0.115
4	0.045	0.046	0.048	0.098	0.098	0.100	0.100	0.101	0.101	0.103	0.105	0.109	0.115
5	0.049	0.049	0.050	0.100	- - -	0.102	0.102	0.103	0.103	0.104	0.107	0.110	0.115
6	0.045	0.045	0.046	0.100	- - -	0.101	0.101	0.103	0.102	0.103	0.106	0.109	0.114
1	-0.781	-0.777	-0.776	-1.724	-1.819	-1.830	-1.864	-1.873	-1.980	-2.005	-2.159	-2.234	-2.436
2	-0.882	-0.850	-0.820	-1.743	-1.797	-1.774	-1.778	-1.772	-1.804	-1.807	-1.895	-1.921	-2.014
3	-1.134	-1.051	-0.964	-2.093	-2.138	-2.056	-2.032	-2.007	-2.005	-1.991	-2.051	-2.050	-2.098
4	-0.994	-0.858	-0.703	-1.489	-1.386	-1.236	-1.183	-1.132	-1.080	-1.033	-1.030	-1.002	-1.005
5	-0.939	-0.752	-0.537	-1.197	-1.024	-0.810	-0.733	-0.650	-0.549	-0.491	-0.463	-0.420	-0.390
6	-0.867	-0.659	-0.404	-0.988	-0.781	-0.527	-0.428	-0.325	-0.023	1.137	- - -	- - -	- - -
7	-0.972	-0.781	-0.557	-1.216	-1.037	-0.818	-0.739	-0.653	-0.557	-0.489	-0.460	-0.415	-0.385
8	-0.947	-0.827	-0.693	-1.417	-1.333	-1.201	-1.156	-1.110	-1.065	-1.025	-1.046	-1.020	-1.023
10	-0.760	-0.733	-0.710	-1.461	-1.494	-1.478	-1.483	-1.478	-1.504	-1.511	-1.581	-1.607	-1.684
11	-0.717	-0.711	-0.711	-1.401	-1.448	-1.457	-1.477	-1.482	-1.539	-1.554	-1.645	-1.686	-1.787

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.704 0.741 0.741 0.778 0.815 0.852 0.889 0.926 0.963 0.963

1	0.119	0.123	0.132	0.130	0.132	0.133	0.136	0.140	0.145	0.143			
2	0.117	0.122	0.129	0.128	0.129	0.131	0.134	0.138	0.143	0.141			
3	0.116	0.120	0.156	0.155	0.155	0.157	0.160	0.164	0.169	0.168			
4	0.115	0.119	0.162	0.161	0.162	0.164	0.166	0.170	0.175	0.174			
5	0.116	0.120	0.156	0.155	0.155	0.156	0.159	0.162	0.167	0.166			
6	0.114	0.119	0.149	0.148	0.148	0.149	0.152	0.155	0.160	0.162			
1	-4.166	-4.271	-5.922	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -			
2	-2.764	-2.821	-3.980	-4.264	-4.412	-4.662	-5.240	-5.622	- - -	- - -			
3	-2.345	-2.376	-3.222	-3.342	-3.377	-3.440	-3.561	-3.645	-3.780	-4.252			
4	-1.035	-1.038	-1.355	-1.316	-1.284	-1.269	-1.236	-1.230	-1.241	-1.298			
5	-0.350	-0.340	-0.577	-0.524	-0.473	-0.408	-0.373	-0.360	-0.357	-0.392			
6	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -			
7	-0.323	-0.311	-0.559	-0.509	-0.463	-0.422	-0.369	-0.342	-0.327	-0.370			
8	-1.058	-1.059	-1.348	-1.319	-1.292	-1.275	-1.251	-1.248	-1.258	-1.314			
10	-2.203	-2.247	-2.916	-3.035	-3.099	-3.214	-3.465	-3.633	-3.878	-4.646			
11	-2.443	-2.498	-3.123	-3.256	-3.339	-3.488	-3.822	-4.048	-4.380	-5.327			

VERSUCHSBALKEN B3

\*\*\*\*\*

BUEGELDEFINITIONEN

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.000 0.111 0.222 0.222 0.333 0.444 0.481 0.519 0.556 0.593 0.630 0.667 0.704

1	-0.014	-0.008	-0.001	0.010	0.011	0.017	0.020	0.022	0.025	0.043	0.051	0.068	0.124
2	0.012	0.009	0.007	0.065	0.061	0.059	0.059	0.058	0.054	0.056	0.020	0.045	0.049
3	-0.018	-0.010	0.000	0.024	0.029	0.037	0.040	0.043	0.044	0.052	0.019	0.051	0.069
4	0.000	0.002	0.005	0.025	0.027	0.032	0.035	0.042	0.094	0.160	0.221	0.289	0.377
5	0.015	0.009	0.002	0.056	0.047	0.041	0.039	0.039	0.039	0.039	-0.001	0.012	0.028
6	0.330	0.336	0.336	0.376	0.375	0.376	0.376	0.426	0.211	0.240	0.243	0.567	0.662
7	0.000	0.005	0.010	0.038	0.041	0.052	0.057	0.068	0.113	0.175	0.321	0.437	0.696
8	0.029	0.021	0.016	0.087	0.078	0.073	0.074	0.075	0.071	0.060	0.012	0.034	0.031
9	0.018	0.005	0.001	0.025	0.014	0.015	0.021	0.039	0.064	0.182	0.368	0.390	0.415
10	0.043	0.023	0.007	0.068	0.047	0.027	0.020	0.015	0.006	-0.008	-0.033	-0.036	-0.049
11	0.027	0.013	0.002	0.033	0.016	0.006	0.003	0.002	-0.003	-0.017	-0.036	-0.047	-0.059
12	0.051	0.138	0.142	0.195	0.233	0.236	0.242	0.249	-0.005	0.080	0.246	0.288	0.355
13	0.045	0.030	0.017	0.071	0.057	0.043	0.036	0.032	0.024	0.021	0.017	0.013	0.016
14	0.014	0.007	-0.001	0.018	0.007	-0.001	-0.006	-0.008	-0.015	-0.010	0.005	0.020	0.044
15	0.008	0.001	-0.003	0.010	0.003	0.001	-0.001	0.001	0.002	0.013	0.042	0.064	0.115
16	0.027	0.020	0.013	0.054	0.046	0.038	0.033	0.031	0.025	0.025	0.025	0.028	0.025
17	0.023	0.016	0.009	0.046	0.036	0.026	0.021	0.020	0.013	0.011	0.009	0.016	0.022

BELASTUNGSGRAD M/MU

MESZSTELLE 0.704 0.741 0.741 0.778 0.815 0.852 0.889 0.926 0.963 0.963

1	0.225	0.235	0.214	0.227	0.246	0.275	0.363	0.420	0.494	0.630			
2	0.070	0.272	0.275	0.290	0.296	0.100	0.118	0.213	0.220	0.263			
3	0.108	0.116	0.095	0.104	0.116	0.133	0.189	0.225	0.278	0.412			
4	0.528	0.541	0.547	0.572	0.601	0.639	0.733	0.789	0.858	0.986			
5	0.108	0.171	0.185	0.263	0.283	0.317	0.364	0.392	0.451	0.513			
6	0.995	0.712	0.687	0.708	0.761	0.772	0.874	0.941	1.017	1.106			
7	0.968	0.983	1.101	1.138	1.183	1.150	1.220	1.277	1.353	1.489			
8	0.023	0.025	0.067	0.077	0.081	0.088	0.120	0.131	0.142	0.174			
9	0.487	0.475	0.620	0.636	0.650	0.655	0.643	0.614	0.626	0.630			
10	-0.065	-0.075	-0.027	-0.028	-0.035	-0.044	-0.051	-0.062	-0.064	-0.043			
11	-0.053	-0.069	0.099	0.129	0.166	0.209	0.261	0.281	0.325	0.401			
12	0.394	0.484	0.709	0.424	0.439	0.438	0.469	0.482	0.508	0.532			
13	0.040	0.035	0.051	0.057	0.054	0.057	0.082	0.101	0.131	0.191			
14	0.256	0.261	0.262	0.284	0.308	0.355	0.433	0.476	0.515	0.541			
15	0.245	0.254	0.225	0.239	0.254	0.286	0.354	0.401	0.449	0.496			
16	0.015	0.013	0.016	0.025	0.025	0.023	0.029	0.034	0.038	0.052			
17	0.042	0.042	0.034	0.043	0.046	0.052	0.087	0.116	0.152	0.196			

Anlage A6.14

VERSUCHSBALKEN B3

\*\*\*\*\*

ERMITTELTE BETONLAENGSDEHNUNG IN PROMILLE

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/CU

MESZSTELLE 0.000 0.222 0.444 0.519 0.556 0.593 0.630 0.667 0.704 0.704 0.741 0.741 0.815 0.889 0.926 0.963

I/21	-0.438	-0.469	-0.814	-0.778	-0.878	-0.791	-0.244	-0.732	-0.812	-1.011	-0.975	-1.145	-1.150	-1.190	-1.243	-1.351
II/24	-0.492	-0.331	-0.669	-0.605	-0.621	-0.605	-0.556	-0.422	-0.442	-0.397	-0.317	-0.465	-0.397	-0.424	-	-0.447
V/33	-0.465	-0.390	-0.608	-0.549	-0.585	-0.528	-0.537	-0.492	-0.556	-0.707	-0.667	-0.726	-0.753	-0.794	-	-0.923
VI/36	-0.440	-0.381	-0.655	-0.653	-0.655	-0.649	-0.646	-0.578	-0.673	-0.778	-0.723	-0.846	-0.923	-0.859	-	-0.964
VI/43	-0.018	-0.005	0.150	0.190	0.129	0.184	0.111	0.152	0.138	0.193	0.270	0.397	0.420	0.497	0.499	0.571
III/27	-0.290	-0.283	-0.422	-0.456	-0.512	-0.535	-0.531	-0.356	-0.259	-0.249	-0.224	-0.231	-0.351	-0.351	-	-0.370
IV/30	-0.277	-0.286	-0.424	-0.433	-0.451	-0.467	-0.565	-0.526	-0.544	-0.698	-0.628	-0.676	-0.735	-0.714	-	-0.810
VII/37	-0.057	-0.220	-0.281	-0.304	-0.399	-0.388	-0.492	-0.481	-0.594	-0.705	-0.655	-0.524	-0.624	-0.696	-0.778	-0.837
VIII/38	-0.039	-0.218	-0.293	-0.288	-0.410	-0.492	-0.624	-0.610	-0.748	-0.948	-0.973	-0.730	-0.848	-0.973	-1.068	-1.209
IX/39	0.086	-0.134	-0.308	-0.381	-0.406	-0.517	-0.728	-0.823	-1.005	-1.272	-1.295	-0.952	-1.082	-1.313	-1.460	-1.664
X/40	0.029	-0.179	-0.340	-0.379	-0.515	-0.590	-0.862	-0.952	-1.091	-1.465	-1.478	-1.163	-1.313	-1.592	-1.755	-2.005
XI/41	0.020	-0.170	-0.315	-0.354	-0.463	-0.481	-0.621	-0.658	-0.714	-0.916	-0.925	-0.730	-0.848	-0.989	-1.107	-1.163
XII/42	0.005	-0.163	-0.247	-0.302	-0.347	-0.351	-0.481	-0.472	-0.506	-0.655	-0.660	-0.524	-0.608	-0.633	-0.816	-0.791
I/18	-0.535	-0.447	-0.921	-0.934	-0.986	-0.952	-0.959	-0.891	-0.939	-1.234	-1.206	-1.431	-1.522	-1.605	-1.649	-1.778
VI/3	-0.578	-0.537	-1.000	-0.925	-0.998	-0.950	-0.943	-0.973	-0.980	-1.181	-1.166	-1.472	-1.556	-1.574	-	-1.660
II/15	-0.472	-0.435	-0.680	-0.646	-0.658	-0.662	-0.565	-0.463	-0.417	-0.358	-0.272	-0.401	-0.413	-0.345	-	-0.274
III/12	-0.485	-0.472	-0.651	-0.585	-0.612	-0.596	-0.630	-0.637	-0.633	-0.830	-0.717	-0.837	-0.921	-0.941	-	-0.991
IV/9	-0.456	-0.401	-0.599	-0.494	-0.533	-0.499	-0.413	-0.293	-0.177	-0.138	-0.084	-0.204	-0.132	-0.011	-	0.682
V/6	-0.390	-0.358	-0.599	-0.522	-0.560	-0.531	-0.483	-0.478	-0.515	-0.646	-0.683	-0.746	-0.841	-0.848	-	-0.946
VI/44	-0.800	-0.751	-1.692	-1.662	-1.776	-1.760	-1.810	-1.830	-2.068	-2.710	-2.689	-3.315	-3.567	-4.027	-4.227	-4.633

ERMITTELTE BETONQUERDEHNUNG IN PROMILLE

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/CU

MESZSTELLE 0.000 0.222 0.444 0.519 0.556 0.593 0.630 0.667 0.704 0.704 0.741 0.741 0.815 0.889 0.926 0.963

I/19	-0.063	-0.086	-0.054	0.018	-0.061	-0.052	-0.009	-0.032	-0.181	-0.175	-0.132	-0.039	-0.093	-0.005	-0.043	-0.079
II/22	-0.116	-0.138	-0.125	-0.077	-0.127	-0.107	-0.043	0.113	0.156	0.293	0.404	0.376	0.447	0.535	-	0.590
V/31	-0.098	-0.127	-0.066	-0.029	-0.098	-0.091	0.005	0.039	0.161	0.288	0.392	0.395	0.474	0.512	-	0.551
VI/34	-0.113	-0.134	-0.073	-0.084	-0.109	-0.107	-0.143	-0.161	-0.120	-0.179	-0.159	-0.052	-0.104	-0.116	-	-0.215
III/25	-0.084	-0.082	-0.070	0.136	0.361	0.590	0.871	1.193	1.224	1.492	1.565	1.721	1.703	1.828	-	1.918
IV/28	-0.091	-0.129	-0.025	0.007	-0.054	-0.029	-0.043	0.111	0.141	0.442	0.540	0.669	0.710	0.909	-	1.111
I/16	-0.061	-0.109	-0.005	-0.002	-0.043	-0.027	-0.059	-0.014	-0.011	-0.113	0.018	0.084	0.018	0.098	0.113	0.145
VI/1	-0.104	-0.118	-0.061	-0.039	-0.086	-0.014	-0.063	0.041	-0.023	-0.045	-0.073	-0.027	-0.061	0.009	-	-0.054
II/13	-0.084	-0.100	-0.061	-0.039	-0.084	-0.086	0.052	0.252	0.340	0.431	0.537	0.599	0.628	0.839	-	0.971
III/10	-0.109	-0.118	-0.066	-0.063	-0.107	-0.084	-0.082	-0.073	-0.088	-0.093	-0.039	0.102	0.692	1.061	-	1.304
IV/7	-0.150	-0.161	-0.098	-0.086	-0.095	-0.091	0.136	0.222	0.295	0.274	0.302	0.415	0.478	0.619	-	0.855
V/4	-0.170	-0.177	-0.143	-0.098	-0.129	-0.156	-0.127	-0.034	0.104	0.420	0.476	0.438	0.460	0.789	-	1.068

ERMITTELTE BETONTRAJEKTORIENDEHNUNG IN PROMILLE

\*\*\*\*\*

BELASTUNGSGRAD Q/CU

MESZSTELLE 0.000 0.222 0.444 0.519 0.556 0.593 0.630 0.667 0.704 0.704 0.741 0.741 0.815 0.889 0.926 0.963

I/20	-0.215	-0.249	-0.519	-0.490	-0.596	-0.574	-0.637	-0.512	-0.644	-0.798	-0.791	-0.875	-0.937	-0.977	-1.059	-1.206
II/23	-0.252	-0.281	-0.562	-0.540	-0.610	-0.590	-0.610	-0.583	-0.692	-0.902	-0.896	-0.889	-0.961	-1.070	-	-1.261
V/32	-0.281	-0.274	-0.549	-0.460	-0.590	-0.551	-0.517	-0.583	-0.644	-0.855	-0.834	-0.855	-0.955	-0.973	-	-1.188
VI/35	-0.245	-0.313	-0.531	-0.531	-0.571	-0.576	-0.660	-0.626	-0.696	-0.807	-0.798	-0.766	-0.907	-0.905	-	-1.122
III/26	-0.209	-0.259	-0.478	-0.524	-0.556	-0.601	-0.721	-0.714	-0.893	-1.293	-1.252	-1.261	-1.363	-1.594	-	-1.939
IV/29	-0.184	-0.306	-0.410	-0.413	-0.488	-0.542	-0.601	-0.660	-0.701	-0.998	-1.014	-0.973	-1.061	-1.184	-	-1.451
I/17	-0.236	-0.320	-0.587	-0.544	-0.599	-0.608	-0.639	-0.628	-0.689	-0.916	-0.800	-0.925	-1.048	-1.048	-1.118	-1.166
VI/2	-0.245	-0.247	-0.492	-0.494	-0.537	-0.517	-0.549	-0.560	-0.569	-0.780	-0.778	-0.846	-0.959	-1.002	-	-1.075
II/14	-0.268	-0.333	-0.537	-0.485	-0.592	-0.605	-0.612	-0.746	-0.714	-0.898	-0.862	-0.896	-0.966	-1.018	-	-1.177
III/11	-0.147	-0.236	-0.440	-0.401	-0.517	-0.488	-0.556	-0.499	-0.599	-0.834	-0.723	-0.834	-0.864	-1.063	-	-1.152
IV/8	-0.240	-0.290	-0.472	-0.497	-0.571	-0.553	-0.621	-0.639	-0.667	-0.828	-0.839	-0.959	-1.025	-1.154	-	-1.329
V/5	-0.204	-0.274	-0.465	-0.442	-0.490	-0.515	-0.519	-0.569	-0.567	-0.753	-0.714	-0.798	-0.875	-0.941	-	-1.063

DEHNUNGEN DES BETONS

1.ZEILE = EPSILON MAX IN PROMILLE

2.ZEILE = EPSILON MIN IN PROMILLE

3.ZEILE = WINKEL ZWISCHEN EPSILON MIN UND DER LAENGSSACHSE

BELASTUNGSGRAD Q/CU

SNITT	LAGE	0.000	0.222	0.444	0.519	0.556	0.593	0.630	0.667	0.704	0.704	0.741	0.741	0.815	0.889	0.926	0.963
1	VORN MIT	-0.060	-0.084	-0.045	0.033	-0.042	-0.022	0.041	-0.009	-0.148	-0.127	-0.070	0.029	-0.006	0.106	0.087	0.088
		-0.441	-0.471	-0.623	-0.793	-0.897	-0.821	-0.894	-0.755	-0.845	-1.059	-1.037	-1.213	-1.237	-1.301	-1.373	-1.518
		-5.361	-4.232	6.304	7.725	8.603	11.213	13.378	10.188	12.528	13.062	14.700	13.551	15.418	16.320	17.367	18.834
1	HINTEN U	-0.053	-0.104	0.011	0.004	-0.035	-0.012	-0.041	0.020	0.036	-0.063	0.052	0.125	0.073	0.147	0.180	0.207
		-0.543	-0.452	-0.937	-0.940	-0.994	-0.967	-0.977	-0.925	-0.986	-1.284	-1.240	-1.472	-1.577	-1.654	-1.716	-1.840
		-7.330	6.978	7.575	4.631	5.080	7.185	8.057	10.906	12.380	11.696	9.302	9.183	10.514	9.539	10.833	9.988
2	VORN MIT	-0.109	-0.127	-0.079	-0.010	-0.032	-0.014	0.103	0.351	0.482	0.865	1.050	0.899	1.098	1.279	- - -	1.501
		-0.499	-0.342	-0.715	-0.672	-0.716	-0.698	-0.702	-0.660	-0.768	-0.969	-0.963	-0.988	-1.048	-1.168	- - -	-1.358
		-7.731	12.864	15.621	18.504	21.848	21.611	25.220	29.012	30.713	33.954	34.504	31.765	33.415	33.462	- - -	34.369
2	HINTEN M	-0.084	-0.088	-0.019	-0.007	-0.009	-0.005	0.214	0.628	0.736	1.051	1.206	1.213	1.301	1.644	- - -	1.996
		-0.472	-0.447	-0.722	-0.678	-0.733	-0.743	-0.727	-0.839	-0.813	-0.978	-0.941	-1.015	-1.086	-1.150	- - -	-1.299
		-1.475	10.679	14.139	12.576	18.799	19.366	24.524	30.416	30.368	33.556	33.933	31.660	32.066	32.461	- - -	33.901
3	VORN CBE	-0.082	-0.056	0.045	0.309	0.574	0.871	1.304	1.791	2.045	2.716	2.791	2.940	2.959	3.313	- - -	3.718
		-0.292	-0.309	-0.537	-0.629	-0.725	-0.816	-0.964	-0.954	-1.080	-1.473	-1.450	-1.500	-1.607	-1.836	- - -	-2.170
		6.028	18.639	26.408	25.441	23.874	24.086	25.903	27.816	30.836	32.718	32.524	31.596	31.633	32.481	- - -	33.568
3	HINTEN M	-0.056	-0.108	-0.055	-0.052	-0.062	-0.044	-0.017	-0.036	0.002	0.062	0.106	0.294	0.986	1.564	- - -	1.897
		-0.538	-0.482	-0.662	-0.596	-0.657	-0.636	-0.695	-0.672	-0.723	-0.985	-0.862	-1.029	-1.215	-1.444	- - -	-1.584
		-19.293	-9.217	7.785	8.219	15.977	15.017	18.063	13.525	20.597	22.655	22.751	22.408	21.451	24.144	- - -	24.375
4	VORN CBE	-0.091	-0.082	0.048	0.084	0.055	0.119	0.091	0.346	0.404	0.912	1.088	1.176	1.261	1.614	- - -	2.018
		-0.277	-0.333	-0.497	-0.510	-0.560	-0.615	-0.699	-0.761	-0.807	-1.168	-1.176	-1.183	-1.286	-1.419	- - -	-1.717
		0.000	25.723	21.459	21.137	24.936	26.659	24.346	27.430	27.781	28.384	29.475	27.626	27.715	28.828	- - -	29.523
4	HINTEN M	-0.138	-0.161	-0.069	0.001	0.024	0.034	0.417	0.621	0.841	0.987	1.076	1.214	1.409	1.796	- - -	2.307
		-0.468	-0.401	-0.628	-0.581	-0.652	-0.624	-0.694	-0.692	-0.723	-0.851	-0.858	-1.003	-1.063	-1.188	- - -	-1.370
		-11.190	2.145	13.122	22.709	24.782	25.833	30.182	33.447	36.222	38.526	39.246	36.894	37.858	38.904	- - -	38.932
5	VORN MIT	-0.098	-0.126	0.007	0.022	0.006	0.016	0.103	0.218	0.375	0.605	0.737	0.723	0.881	0.917	- - -	1.058
		-0.465	-0.391	-0.681	-0.600	-0.689	-0.635	-0.635	-0.671	-0.770	-1.024	-1.012	-1.054	-1.160	-1.199	- - -	-1.430
		-0.078	3.361	19.018	16.666	22.791	23.931	21.403	26.662	25.619	26.189	26.378	25.446	26.523	25.937	- - -	26.832
5	HINTEN M	-0.146	-0.177	-0.124	-0.060	-0.084	-0.089	-0.027	0.128	0.270	0.720	0.738	0.721	0.754	1.196	- - -	1.574
		-0.414	-0.358	-0.618	-0.560	-0.605	-0.598	-0.583	-0.640	-0.681	-0.946	-0.945	-1.029	-1.135	-1.255	- - -	-1.452
		-17.320	2.054	11.203	15.954	17.013	21.224	25.124	27.327	24.716	25.106	23.246	23.705	23.229	24.039	- - -	24.134
6	VORN MIT	-0.110	-0.122	-0.028	-0.041	-0.050	-0.042	-0.029	-0.039	0.011	-0.034	0.014	0.059	0.054	0.071	- - -	0.062
		-0.443	-0.393	-0.700	-0.696	-0.714	-0.714	-0.760	-0.700	-0.804	-0.923	-0.896	-0.957	-1.081	-1.046	- - -	-1.241
		-5.453	12.099	14.925	14.867	17.348	18.076	23.276	25.447	23.643	23.822	25.847	19.303	21.929	24.168	- - -	27.441
6	HINTEN U	-0.085	-0.103	-0.059	-0.039	-0.086	-0.013	-0.061	0.050	-0.018	-0.021	-0.050	-0.021	-0.046	0.039	- - -	-0.025
		-0.597	-0.552	-1.002	-0.925	-0.998	-0.951	-0.945	-0.982	-0.985	-1.205	-1.189	-1.478	-1.571	-1.604	- - -	-1.689
		-11.026	-10.510	-2.344	0.776	-0.314	2.138	2.984	5.252	4.015	8.192	8.087	3.804	5.692	7.750	- - -	7.594

Anlage A6.16